

**НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ
імені ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»**

Факультет електроніки
(повна назва інституту/факультету)

Кафедра мікроелектроніки
(повна назва кафедри)

«На правах рукопису»
УДК _____

«До захисту допущено»

Завідувач кафедри
_____ Борисов О.В.
(підпис) (ініціали, прізвище)
“ ” _____ 2018 р.

Магістерська дисертація

на здобуття ступеня магістра

зі спеціальності 153 «Мікро- та наносистемна техніка»
(код і назва)

на тему: «Пристрої НВЧ на основі тонких діелектричних резонаторів»

Виконав: студент 2-го курсу, групи ДП-71мп
(шифр групи)

Черченко Максим Олександрович
(прізвище, ім'я, по батькові) (підпис)

Науковий керівник ст. викл., к.т.н. Діденко Ю.В.
(посада, науковий ступінь, вчене звання, прізвище та ініціали) (підпис)

Консультант з нормоконтролю доц., доц., к.т.н. Орлов А.Т. _____

Консультант з інформаційних питань доц., доц., к.т.н. Татарчук Д.Д. _____

Консультант з наукових питань доц., доц., к.т.н. Татарчук Д.Д.

Рецензент _____
(посада, науковий ступінь, вчене звання, науковий ступінь, прізвище та ініціали) (підпис)

Засвідчую, що у цій магістерській дисертації
немає запозичень з праць інших авторів без
відповідних посилань.

Студент _____
(підпис)

Київ – 2018 року

РЕФЕРАТ

Актуальність теми

Застосування діелектричних резонаторів в електроніці НВЧ сприяє створенню високоефективних резонансних пристроїв. Вдосконалення характеристик цих систем є актуальною задачею.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.

Робота пов'язана з науковими програмами, планами та темами що розроблюються на кафедрі.

Мета і задачі дослідження.

Метою даної роботи є вдосконалення пристроїв НВЧ на основі тонких діелектричних резонаторів.

Для досягнення мети, необхідно виконати наступні задачі:

1. Проаналізувати існуючі структури НВЧ.
2. Дослідити структури НВЧ на основі тонких діелектричних резонаторів.
3. Показати перспективність конструювання пристроїв НВЧ на основі тонких діелектричних резонаторів.

Об'єктом дослідження є структури НВЧ на основі тонких діелектричних резонаторів.

Предметом дослідження є електродинамічні властивості і характеристики тонких діелектричних резонаторів.

Методика наукового дослідження включає: методи аналізу НВЧ-пристроїв, аналітичне моделювання.

Практичне значення одержаних результатів.

Запропоновано конструкції керованого фазообертача на основі тонких діелектричних резонаторів, що дозволило знизити керуючу напругу.

Особистий внесок здобувача:

- Експериментально досліджено електродинамічні характеристики фазообертачів на основі тонких діелектричних резонаторів.
- Запропоновано конструкції фазообертачів із зниженою керуючою напругою.

Структура і об'єм роботи.

Робота складається зі вступу, шістьох розділів, висновків та списку використаних джерел. Загальний обсяг дисертації становить 76 сторінки. Робота включає 16 рисунків, 29 таблиць, список використаних джерел з 26 найменувань.

Ключові слова: діелектричний резонатор, тангенс кута діелектричних втрат, фазочастотна характеристика

ABSTRACT

Actuality of theme

The use of dielectric resonators in microwave electronics helps to create highly effective resonance devices. Improving the characteristics of these systems is an urgent task.

Relationship of work with scientific programs, plans, themes.

The work is connected with the scientific programs, plans and themes that are being developed at the department.

The purpose and tasks of the study.

The purpose of this work is to improve the microwave devices based on thin dielectric resonators.

To achieve the goal, you need to accomplish the following tasks:

1. Analyze existing microwave structures.
2. To study the microwave structure on the basis of thin dielectric resonators.
3. Show the prospect of designing devices on microwave based on thin dielectric resonators.

The object of the study is the structure of microwave based on thin dielectric resonators.

The subject of the study is electrodynamic properties and characteristics of thin dielectric resonators.

The method of scientific research includes: methods of analysis of microwave devices, analytical modeling.

The practical value of the results.

The designs of a controlled phase rotator on the basis of thin dielectric resonators were proposed, which allowed to reduce the control voltage.

The applicant's personal contribution:

- Electrodynamic characteristics of phase rotators on the basis of thin dielectric resonators have been experimentally investigated.
- The designs of phase rotators with reduced control voltage are proposed.

Structure and volume of work.

The work consists of an introduction, six sections, conclusions and a list of sources used. The total volume of the dissertation is 76 pages. The work includes 16 drawings, 29 tables, list of used sources from 26 titles.

Keywords: dielectric resonator, tangent of the angle of dielectric losses,
phase-frequency characteristic

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ ТА УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ.....	7
ВСТУП.....	8
РОЗДІЛ 1: ДІЕЛЕКТРИЧНІ РЕЗОНАТОРИ	9
1.1 Класифікація діелектричних резонаторів	9
1.2 Власні коливання діелектричних резонаторів	15
1.3 Реалізація НВЧ-пристроїв на діелектричних резонаторах.....	21
1.4 Діелектричні резонатори з перелаштуванням частоти.....	26
Висновки до розділу.....	31
РОЗДІЛ 2: ФАЗООБЕРТАЧІ	32
2.1 Різновиди фазообертачів.....	32
2.2 Особливості конструкції фазообертачів.....	35
2.3 Параметри фазообертачів.....	43
Висновки до розділу.....	44
РОЗДІЛ 3: ФАЗООБЕРТАЧІ НА ОСНОВІ РЕЗОНАНСНИХ СТРУКТУР	45
3.1 Фазобертачі на основі тонких діелектричних резонаторів	45
3.2 Керовані фазообетачі на основі комбінованих діелектричних резонаторів.....	51
Висновки до розділу.....	54
РОЗДІЛ 4: РОЗРОБЛЕННЯ СТАРТАП-ПРОЕКТУ	55
4.1. Опис ідеї проекту.....	55
4.2. Технологічний аудит ідеї проекту	57
4.3. Аналіз ринкових можливостей запуску стартап-проекту	57
4.4. Розроблення ринкової стратегії проекту	64
4.5. Розроблення маркетингової програми стартап-проекту	66
Висновки до розділу.....	69
ВИСНОВКИ	70
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	71
ДОДАТКИ	74

ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ ТА УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ

АЛТК — кераміка на основі LnAlO_3 та CaTiO_3

АЧХ — амплітудно-частотна характеристика

ДР — діелектричний резонатор

ДКР — діелектричний комбінований резонатор

НВЧ — надвисокі частоти

ТБНС — кераміка на основі $\text{BaSm}_2\text{Ti}_4\text{O}_{12}$ та $\text{BaNd}_2\text{Ti}_4\text{O}_{12}$

ФЧХ — фазочастотна характеристика

ХДР — хвилевідно-діелектричний резонатор

D — діаметр циліндричного резонатора

R — радіус циліндричного резонатора

f, f — частота

f_0, f_0 — резонансна частота

φ — фаза

f_0 — резонансна частота

ε — діелектрична проникність

λ — довжина хвилі

$\text{tg}\delta$ — тангенс кута діелектричних втрат

Q — добротність

ξ — узагальнена розстройка

ω — циклічна частота

ВСТУП

Інформатизація сьогодні є одним з найважливіших аспектів розвитку суспільства. Інформаційна система впроваджується у всі сфери життя, а надійність і ефективність її функціонування напряду залежить від якості засобів зв'язку. Це приводить до необхідності розробки нових, більш дешевих і в той же час ефективних пристроїв, якість яких значною мірою визначається якістю резонансних елементів НВЧ.

Застосування діелектричних резонаторів в електроніці НВЧ сприяє створенню високоефективних резонансних пристроїв. Пристрої на основі діелектричних резонаторів мають компактні розміри, високу добротність і порівняно низьку ціну.

Мета даної роботи – показати можливість вдосконалення НВЧ структур за рахунок використання тонких діелектричних резонаторів.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити наступні завдання:

- теоретично та експериментально дослідити структури НВЧ на основі тонких діелектричних резонаторів;
- запропонувати конструкції пристроїв НВЧ на їх основі.

Об'єктом дослідження є НВЧ структури на основі тонких діелектричних резонаторів.

Предметом дослідження є електродинамічні характеристики тонких діелектричних резонаторів.

РОЗДІЛ 1: ДІЕЛЕКТРИЧНІ РЕЗОНАТОРИ

1.1. Класифікація діелектричних резонаторів.

В процесі розвитку електроніки розвивалися НВЧ прилади, а разом із ними і діелектричні резонатори. На сьогодні це дає змогу класифікувати ДР з урахуванням фізичних явищ та основних застосувань ДР.

Діелектричний резонанс виникає при взаємодії електромагнітної хвилі з обмеженим діелектричним тілом та пов'язаний з граничними умовами на межі діелектричного тіла з діелектричною проникністю ϵ_d та оточуючим середовищем з діелектричною проникністю ϵ_c , що менша за ϵ_d . Основою ДР є розсіювання первинної електромагнітної хвилі, що падає на діелектрик, та її суперпозиції з полем вторинної хвилі, що виникає внаслідок коливання вільних та зв'язаних зарядів в діелектрику під дією первинної хвилі [1]. У формуванні резонансних явищ в діелектричному тілі можуть брати участь металеві екрануючі поверхні для забезпечення спрямованого розповсюдження енергії, що була повторно випромінена ДР. Частотний спектр розсіювання електромагнітних хвиль можна розділити на три частини, внаслідок чого можемо виділити наступну класифікацію (табл. 1.1).

Внаслідок того, що в області резонансного розсіювання довжина хвилі в діелектрику порівнювана з розмірами діелектричного тіла, в цій області на певних частотах стає можливим співпадання за фазою первинної і вторинної хвиль, що призводить до резонансного зростання поля розсіяної хвилі. Резонансні явища в цій області складніше за інші піддаються теоретичному поясненню.

Таблиця 1.1. - Класифікація розсіювання електромагнітних хвиль діелектричним тілом.

Частотний спектр розсіювання електромагнітних хвиль діелектричним тілом		
Низкочастотна область ($\lambda_d \gg a$)	Область резонансного розсіювання (λ_d порівняна з a)	Високочастотна область ($\lambda_d \ll a$)
Теорія релеївського розсіювання	Теорія резонансного розсіювання	Метод геометричної оптики
Резонанс відсутній	Об'ємний резонанс в режимі стоячих хвиль	Об'ємний або поверхневий резонанс в режимі стоячих або рухомих хвиль

Саме в цій області працюють ДР з об'ємним резонансом. Їх можна класифікувати за різними параметрами та ознаками. ДР можна поділити на такі характеристики:

1. За матеріалом:

- однородні та неоднородні (складаються з декількох матеріалів);
- двошарові та багатошарові;
- лінійні та нелінійні;
- за технологією виготовлення.

Величина діелектричної проникності ϵ_d матеріала ДР визначає співвідношення між зовнішнім і внутрішнім полями ДР, що призводить до залежності частоти та добротності ДР від оточуючих предметів, здатність вмикатись у зовнішні електромагнітні поля та випромінювати електромагнітні хвилі назовні.

2. За формою та співвідношенням розмірів:

- сферичні;
- циліндричні (дискові та стрижневі);
- багатогранники (призми, параллелепіпеди, крестоподібні, Т-образні, кубічні та інші);
- з отворами, заглибленнями, прорізами і тому подібне.

Форма та співвідношення розмірів ДР визначає спектр власних частот, структури полів та співвідношення між частотами та добротностями різних типів коливань.

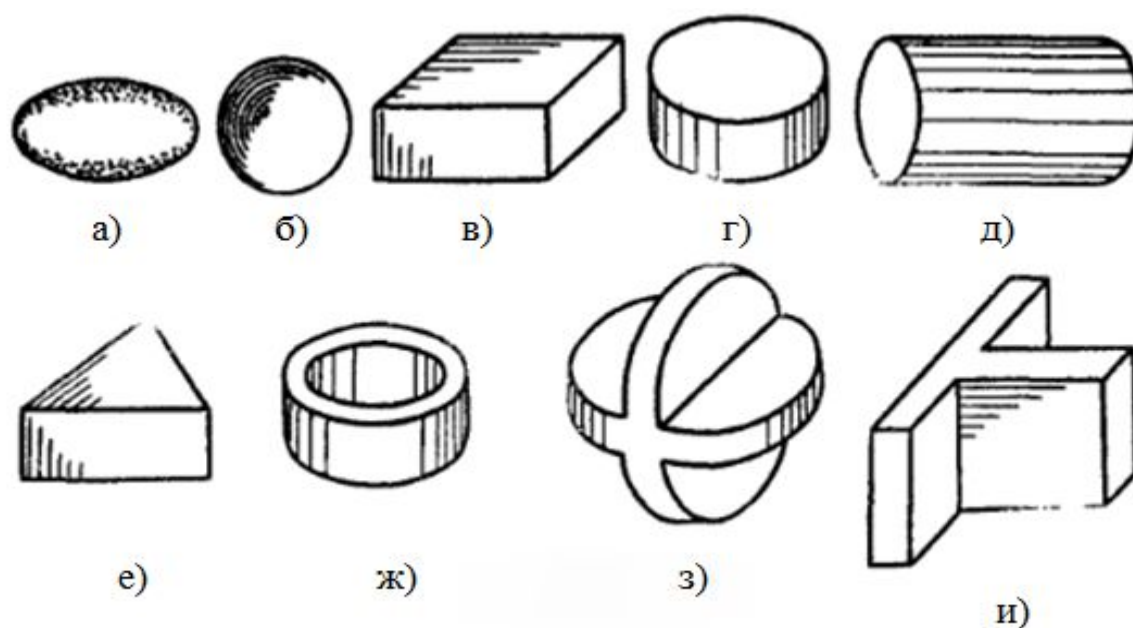


Рис.1.1. Зовнішній вигляд однорідних ДР за різних форм та співвідношень розмірів:

а) еліпсоїдальний; б) сферичний; в) прямокутний; г) циліндричний дисковий; д) циліндричний стрижневий; е) трикутний; ж) кільцевий; з) хрестоподібний; и) Т-подібний.



Рис.1.2. Зовнішній вигляд неоднорідних ДР (двох-, трьох-, та багат шарових).

3. За наявності металевих елементів:

- випромінюючі (відкриті);
- не випромінюючі (екрановані частково або повністю);
- симетричні (з замкненою металевою поверхнею навколишнього поля ДР);
- не симетричний (з замкненою металевою поверхнею навколишнього поля ДР).

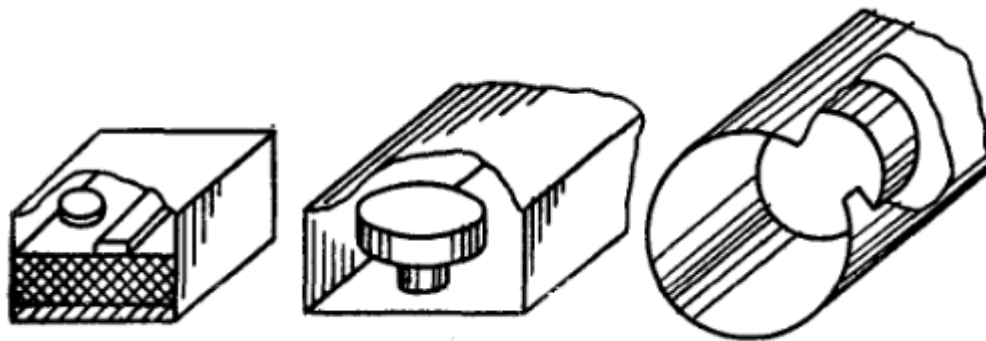


Рис.1.3. Зовнішній вигляд екранованих однорідних та неоднорідних ДР (на підкладці смужкової лінії, в прямокутному та круглому хвилеводах)

Важливою ознакою, за якою слід розділяти ДР, є наявність в полі ДР металевих елементів поверхні, а також їх вигляд і міра впливу на характеристики ДР. Металеві елементи вводять в поле ДР для вилучення втрат енергії ДР на випромінювання та для передачі енергії ДР в необхідному напрямку.

4. За наявністю зовнішніх зв'язків:

- із вільним простором;
- із полями хвильоводів (порожніх всередині, коаксіальних, полоскових та мікрополоскових, діелектричних);
- з полями резонаторів [1].

Слід відокремити металодіелектричні резонатори, які побудовані на основі хвилеводу, що заповнений діелектриком таким чином, що резонансні явища в них зумовлені сукупністю хвильових процесів у хвилеводі і діелектрику. У таких конструкціях використовуються зразки із невисоким (менше 20) значенням ϵ та розмірами підібраними так, щоб в цих зразках не виникав резонанс у робочому діапазоні частот. Вплив цього зразка зводиться до деформації структури електромагнітного поля хвилеводу. При цьому розрізняють два різновиди ХДР: резонатори з використанням регулярних хвилеводів, що працюють в одномодовому режимі з хвилею основного типу, і резонатори на основі поза межних хвилеводів.

Одним з перспективних типів НВЧ коливальних систем є резонатор з Е - типом коливань. Ці резонатори відрізняються від традиційних тим, що на їх поверхню спеціальним чином нанесено метал, що робиться для того, щоб створити умови, які б сприяли збудженню коливань Е-типу і перешкоджали б виникненню коливань Н - типу. Структура полів цього типу дуальна до структури полів Н-типу (рис.1.4). Як показали дослідження, такі структури мають менші габарити і вагу, більш розріджений частотний спектр та менше зовнішнє поле порівняно з резонаторами Н-типу, легко узгоджуються з НВЧ лініями передачі, при виготовленні цих структур можливе використання планарної технології, ці

1.2. Власні коливання діелектричних резонаторів.

Розв'язок задачі коливання діелектричних резонаторів полягає в визначенні розподілення полів в ДР та оточуючому просторі, частот та добротностей власних та вимушених коливань, інтенсивності розсіювання енергії. Розв'язок цієї задачі пов'язан з теорією розсіювання електромагнітних хвиль на обмежених діелектричних тілах, розташованих в вільному просторі, або в просторі повністю чи частково обмеженому металевими поверхнями, наприклад, порожнім хвилеводом. Розв'язок має складності, пов'язані з розглядом як внутрішньої області резонатора, так і зовнішньої області - навколишнього середовища. Крім того поряд із внутрішнім відбиттям від меж розділу середовищ необхідно враховувати особливості поля на краях і ребрах зразка. Для ДР у вільному просторі необхідно враховувати явище формування сферичної хвилі, що йде від резонатора. Наявність зовнішніх полів ДР вимагає врахування їх збурення навколишніми елементами. [3]

Беручи до уваги той факт, що точні розрахунки характеристик ДР складно розрахувати, скористаємось наближеними методами розрахунку. Оскільки серед точних аналітичних розв'язків відомий лише для сфери розташованої у вільному просторі, для розрахунку інших форм використовуються аналітичні методи різних модельних наближень ДР. Так, наприклад, за моделлю магнітної стінки, всі стінки ДР вважаються ідеально магнітними [4].

Необхідна наявність симетрії поверхонь резонатора щодо осей кристала, щоб тензор ϵ можна було діагоналізувати та застосувати для розрахункової моделі. При цьому власні коливання анізотропних ДР не можна розділити на Н- і Е- типи коливань, крім того випадку, коли використовуються одноосні кристали (рутил, ніобат літію, титанат стронцію та ін.) при рівності нулю одного з індексів типу коливань прямокутних призм, а також випадок симетричних типів коливань кругових циліндрів. Вплив анізотропії може призводити до появи додаткових

потенційних членів у розкладанні поля [4]. Оскільки ми скористалися першим наближенням і вважаємо стінки ДР ідеально магнітними, то спектр коливань розділяється на Е- і Н- типи аналогічно об'ємним резонаторам. Оскільки ми використовуємо модуль наближення, то в нас буде різниця в розрахункових даних та експериментальних значеннях, але зі збільшенням номеру типу коливання похибка буде мінімізуватись. Так, наприклад, для нижчої моди може складати 20%.

Для уточнення розрахунку резонансних частот нижчих типів коливань ДР скористаємось другим наближенням, що комбінує ідеальні магнітні стінки із реальними умовами на межевих поверхнях діелектричного зразка. Припустимо, що діелектрична призма або циліндр знаходяться в нескінченному позамежному хвилеводі із магнітними стінками. В той час припускаємо, що поле зосереджено здебільшого у середині ДР і зміна поля в поздовжньому напрямку відбувається по косинусоїдальному закону, в той час як поза ДР за експоненційноному. А енергія при цьому потрапляє крізь торцеві стінки резонатора. Це призводить до того, що для циліндрів і призм похибка розрахунку резонансної частоти нижчого Н- типу коливань складає 5...10%.

Хвилеводна модель, що враховує проникнення поля через циліндричну поверхню резонатора використовується для аналізу нижчих типів коливань. Поле всередині резонатора розподілене таким же чином, як і в регулярному діелектричному хвилеводі, а за торцевими поверхнями - як у позамежному діелектричному хвилеводі без урахування поля у зовнішніх кутових областях. Це призводить до нехтування полем в кутових зовнішніх областях. Розбіжність розрахункових і експериментальних значень резонансної частоти складає 3.5...7 %, причому похибка зростає для зразків ДР із зменшенням висоти діелектричного резонатора відносно його діаметра та зі зменшенням ϵ матеріалу, з якого виготовлений ДР.

За рахунок введення ефективного значення поздовжнього хвильового числа резонант β_e , яке знаходиться із порівняння розподілу поля вздовж осі Z в еквівалентному діелектричному хвильоводі, та поля у моделі ДР з магнітними стінками проводиться уточнення результатів. При цьому похибка розрахунку склала менше 4%. У роботі [2] хвильоводна модель уточнюється заміною ϵ ДР на ефективне значення ϵ_e , що визначається з умови відсічки еквівалентного діелектричного хвильоводу. Такий спосіб дозволяє зменшити похибку розрахунків до 1.5%.

У практичних розрахунках підвищити точність (приблизно до 1%) дозволяє використання номограм ϵ_e , побудованих за даними експериментальних вимірів резонансних частот ДР у залежності від величини ϵ ДР і співвідношення його геометричних розмірів.

Під час наближення $\epsilon \rightarrow \infty$ задача аналізу власних коливань ДР з високим значенням ϵ для зразків довільної форми представляється розкладанням векторів поля в ряди по малому параметру $\epsilon^{-n/2}$. При цьому обмежуємо облік перших непарних степенів n для E - і степенів n для H -векторів поля. Процедура близька до розкладання в ряди Релея [7]. Наближення першого порядку ($n=0,1$) задовільне, якщо розміри резонатора залишаються малими відносно довжини хвилі у вільному просторі λ_v , і тому може бути застосоване тільки до нижчих типів коливань. Врахування членів більш високого порядку пом'якшує це обмеження [7]. Даний метод дозволяє провести оцінку резонансних частот і радіаційних добротностей кільцевих ДР у дипольному наближенні.

Оскільки точність розрахунків резонансних частот по наближених моделях незадовільна вводимо поправки по кутових і кругових циліндричних резонаторах. За рахунок поправки для нижчого $TE_{01\delta}$, варіювання імпедансу на бічній поверхні резонатора, що підвищує точність розрахунків приблизно до 1%. При використанні

комбінації першого і другого наближень магнітної стінки, похибка при розрахунках для циліндричних ДР склала 1%.

Узгодивши поля всередині і поза бічною поверхнею ДР було отримане інтегральне рівняння, що є альтернативою наближеним методам розрахунку моделей ДР, та має назву чисельних методів електродинаміки [10].

Розв'язок допоміжної задачі для напівнескінченного діелектричного кругового циліндра отримано за рахунок нижчого $H_{01\delta}$ - типу коливань, а також за оцінки випромінювання і відбиття симетричних Е- і Н- типів хвиль від торця напівнескінченного циліндра. По розрахованій діаграмі залежності хвильового числа і коефіцієнта відбиття (торця циліндра) від частоти визначена довжина циліндра, при якій виконується умова резонансу на заданій частоті. Врахування випромінювання дозволило визначити радіаційну добротність ДР у вільному просторі і при наявності симетричних металевих площин [12].

Для розв'язку задачі про власні коливання дискових ДР використовують метод часткових областей, тобто поперечний перетин резонатора розбивається на підобласті, що мають просту геометричну форму і описуються координатними поверхнями. У кожній із них знаходяться електромагнітні поля, що задовольняють граничним умовам задачі. У [12] умови неперервності поля на межах поділу підобластей трактуються в термінах найменших квадратів, а дискретизація задачі проводиться методом Рітца - Гальоркіна. У роботі [14], використовуючи ортогональність власних функцій часткових областей і узагальнений метод Фур'є, задачу зведено до системи інтегральних рівнянь Фредгольма І-го роду щодо тангенційних складових на межах поділу часткових областей. Її розв'язок проведений методом Гальоркіна з базисом, що враховує особливості поля на ребрах.

Задача аналізу власних коливань може бути розв'язана методом поверхневих інтегральних рівнянь для ДР представлених тілом обертання, а за граничних умов

на поверхні резонатора утворюється система двох інтегральних рівнянь щодо еквівалентних електричних і магнітних поверхневих струмів, що розв'язана методом моментів [13].

Для аналізу складних електродинамічних систем використовуються методи, що базуються на чисельному розв'язку рівнянь Максвелла, наприклад метод кінцевих елементів [2], метод кінцевих різниць в частотній області [2], метод кінцевих різниць в часовій області [2]. Похибка розрахунку при цьому не перевищує 1-2 %. Але за допомогою цих методів можна отримати лише чисельний результат. Крім того для використання цих методів необхідно матиточні умови на межах розглядуваної області, що ускладнює аналіз відкритих ДР.

Подальший розвиток чисельних методів електродинаміки спрямований як на шлях узагальнення розв'язків для різних варіантів застосування ДР, так і пошук розв'язків для більш складних конструкцій ДР. Особливе місце тут приділяється вдосконаленню і побудові нових алгоритмів і програм, що реалізують дифракційні моделі ДР [17].

Слід відзначити, що традиційно розглядалися , в основному, структури з Н-типом коливань. Це було викликано тим , що вони мають більш високу добротність.

Внаслідок того, що структури з Н-типом коливань мають більш високу добротність, їх розглядали в першу чергу. Але у зв'язку з розвитком електроніки з'явилась необхідність створення мініатюрних пристроїв НВЧ з електрично керованими характеристиками, що в свою чергу базуються на використанні мікрополоскових ЛПП та пристроїв на їх основі, що дає змогу використовувати інтегральну технологію виготовлення. А оскільки все частіше використовують такі напівпровідникові прилади як р-n, р-i-n - діоди і т.д., що мають металічні контакти, для керування характеристиками НВЧ пристроїв, що впливає на розподіл електромагнітних полів в цих приладах, це призвело до необхідності розрахунку полів цих структур.

Частково цю проблему вдалося розв'язати використовуючи методики розрахунку структур з Н- типом коливань. Так було використано метод часткових областей і умови ідеальних електричних стінок ($E_\tau=0$; $[H, n_0]=J_s$) для розрахунку власних частот Е- типів коливань циліндричних відкритих резонаторів [3]. При цьому похибка розрахунку склала приблизно 4-5%.

Оскільки ці методи не завжди можуть бути використані для розрахунку структур з Е - типом коливань, особливо при розрахунку добротності таких структур, це призвело до розробки нових методів, що враховують особливості структур з Е - типом коливань. Так було розроблено методики розрахунку параметрів НВЧ ЛП для інтегральних схем, що можуть виготовлятися на основі планарної технології [19] та модель для розрахунку параметрів циліндричного ДР з Е - типом коливань [19]. Ця модель дає змогу розрахувати власну частоту і добротність моди $E_{01\delta}$ для циліндричного ДР з Е - типом коливань. При цьому похибка не перевищувала 2% при розрахунку частоти і 10% при розрахунку добротності, але ця модель дозволяє розрахувати характеристики лише одної моди резонатора простої одношарової конструкції для випадку, коли металічні дзеркала знаходяться у стані надпровідності. При цьому не враховується вплив провідності металу на добротність системи.

Складності розв'язку задачі про власні коливання ДР з Е - типом коливань істотно зростають для ДКР. Тому, виходячи із специфіки даної задачі, було вирішено використати для їх аналізу метод часткових областей. За допомогою даного методу було отримано систему інтегральних рівнянь, яку розв'язано методом моментів (Бубнова-Гальоркіна).[2]

1.3. Реалізація НВЧ-пристроїв на діелектричних резонаторах.

Використовуючи розглянуті раніше ДР та фільтри, що побудовані на їх основі (мультиплексори, дільники потужності) в поєднанні з напівпровідниковими приладами, можна створити багатофункціональні твердотільні пристрої, що забезпечують стабілізацію частоти, вибірковість сигналу, керування рівнем, фазою, випроміненням або прийомом сигналу, а також ефективні системи радіоелектронної апаратури, нового покоління в сантиметровому та міліметровому діапазонах хвиль. При цьому збільшується надійність, зменшується вага, розміри, вартість та металоємність пристроїв.

Принцип побудови смуго-пропускних фільтрів на основі ДР полягає у використанні вхідної і вихідної ЛП, електромагнітний зв'язок між якими забезпечується внаслідок перевипромінення енергії ДР [20]. При цьому необхідною умовою є розташування відрізків поза межних хвилеводів, металевих перегородок з отворами, або вибір форми та організація елементів зв'язку між ДР і ЛП, що дасть змогу забезпечити добру розв'язку між вхідною і вихідною ЛП.

Основні характеристики генераторів сантиметрового діапазону хвиль:

- відносна нестабільність частоти $(0,6...1) \cdot 10^{-6} \text{ 1/C}$;
- потужність на виході до 70...80 мВт;
- КПД близько 20%.

Подальше підсилення при розробці НВЧ-генераторів спрямовані на розв'язок наступних задач:

- створення багатофункціональних генеруючих пристроїв, що одночасно виконують функції генератора і маніпулятора (частотного, фазового);
- генератора, забезпечуючого переналаштування частоти при високій стабільності;

- багаточастотні генератори;
- генератори-перетворювачі частоти;

Наявність зовнішнього електромагнітного поля ДР, що обумовлює:

- малі значення радіаційної добротності;
- створення ефективних випромінюючих антенних елементів та решіток для хвиль з лінійною і круговою поляризацією;
- при малих габаритних розмірах антен можна отримати високу вибірковість.

Якщо коефіцієнт посилення елементарних випромінювачів на ДР становить 5...7 дБ, то коефіцієнт посилення лінійних решіток на їх основі досягає 15...17 дБ.

Подальші дослідження в цій області спрямовані на вирішення наступних проблем:

- створення ефективних випромінювачів дециметрового і міліметрового діапазонів хвиль;
- розробка методик їх розрахунку і настройки; синтез антенних пристроїв із заданими складними за формою діаграмами спрямованості (ДС);
- розробка моделей і методів дослідження, аналізу і синтезу антенних решіток на ДР; суміщення ДР-випромінювачів з активними елементами і створення на цій основі антенних систем з керованими характеристиками випромінювання (адаптивних в перспективі);
- застосування ДР для корекції характеристик існуючих антен НВЧ; використання плівкової технології виготовлення випромінювачів на ДР.

Застосування ДР в пристроях вимірювання параметрів діелектриків, матеріалів і середовищ [15; 17] дозволяє підвищити їх ефективність, чутливість і точність вимірювань, спростити конструкцію і зменшити масу та габаритні розміри. Для застосування ДР в якості різних датчиків інформації використовують залежності резонансної частоти і власної добротності ДР від діелектричної проникності, температури, вологості і втрат в навколишнє середовище. Основні

напрямки робіт в цій галузі - створення простих, але ефективних датчиків вимірювання ϵ_d і $\tan \delta$ діелектриків, вологості матеріалів і газів, тиску середовища, інтенсивності електричного і магнітного полів; датчиків концентрації електромагнітного поля; розробка та обґрунтування методик і схем вимірювань із заданою точністю.

Для обробки НВЧ - сигналів використовують пристрої, виконані на основі або з використанням ДР, - це дискримінатори, фазообертачі, модулятори, що уповільнюють системи, фільтруючі пристрої з керованими параметрами, перетворювачі частоти, підсилювачі, помножувачі тощо.

Для створення пристроїв обробки НВЧ - сигналів необхідно:

- проектування пристроїв, що володіють сукупністю різних функцій;
- розробка методів розрахунку їх електричних характеристик і параметрів, які відповідають заданим вимогам;
- також побудова модулів радіоелектронної апаратури, що виконують функції НВЧ-приймачів.

Розглянемо застосування ДР на прикладі антенної решітки. ДР як найпростіші, близькі до елементарних, випромінювачі можна успішно використовувати в антенних решітках. При обмеженні смуги частот, в якій повинна працювати радіоелектронна система, застосування ДР в АР переважніше в порівнянні з іншими відомими випромінювачами (хвилеводними, спіральними, вібраторними тощо). Це обумовлено наступними властивостями:

- досить широкої ДС випромінювача на ДР;
- дуже незначним реактивним полем на резонансній частоті;
- ефективністю ДР як перевипромінювача.

На основі ДР можлива побудова ефективних конформних антенних решіток, необхідність розробки яких в даний час дуже актуальна. При цьому схеми побудови АР (рис. 1.3) на ДР аналогічні відомим, широко застосовуваним в існуючих

решітках. Лінійна АР, що представляє собою директорну антену на циліндричних ДР, зображена на рис. 1.5. У загальному випадку вона містить n перевипромінюючих пасивних резонаторів (директорів), віддалених на відстані d_n від центра активного ДР, розташованого в діафрагмі і порушуваного регулярною лінією передачі (не обов'язково прямокутним хвилеводом). Від відстаней d_n , орієнтації, форми перевипромінюючих ДР, їх кількості залежать характеристики випромінювання і АЧХ антени.

Для отримання максимального коефіцієнта посилення такої АР відстані d_n кожного з пасивних ДР до активного резонатора в діафрагмі необхідно вибирати рівними:

$$d_n = (2n - 1)\lambda_0/4, \quad (1.1)$$

де n - порядковий номер пасивного ДР; λ_0 - резонансна довжина хвилі ДР на основному типі коливань. Пояснюється це наступним. Електромагнітна хвиля, що випромінюється активним ДР, збуджує коливання основного H_{011} типу послідовно в резонаторах 1,2 ..., n . При цьому фаза коливань в них відрізняється від фази коливань в активному резонаторі на кут $\Delta\Psi = \frac{\pi}{2}(2n - 1)$.

Це викликано тим, що ДР, розташований в вільному просторі, на резонансній частоті не вносить додаткового фазового зсуву в перевипромінюване ним поле щодо хвилі, яка його збуджує, а тому фазові співвідношення коливань в пасивних резонаторах однозначно визначаються їх видаленням від резонатора-збудника. Отже, в осьовому напрямку хвилі, які перевипромінюються директорами, синфазно складаються з хвилею, що випромінюється активним резонатором. У протилежному напрямку (задньому півпросторі) відбувається протифазне складання електромагнітних хвиль, що випромінюються резонатором, розташованим в діафрагмі і директорами [14].

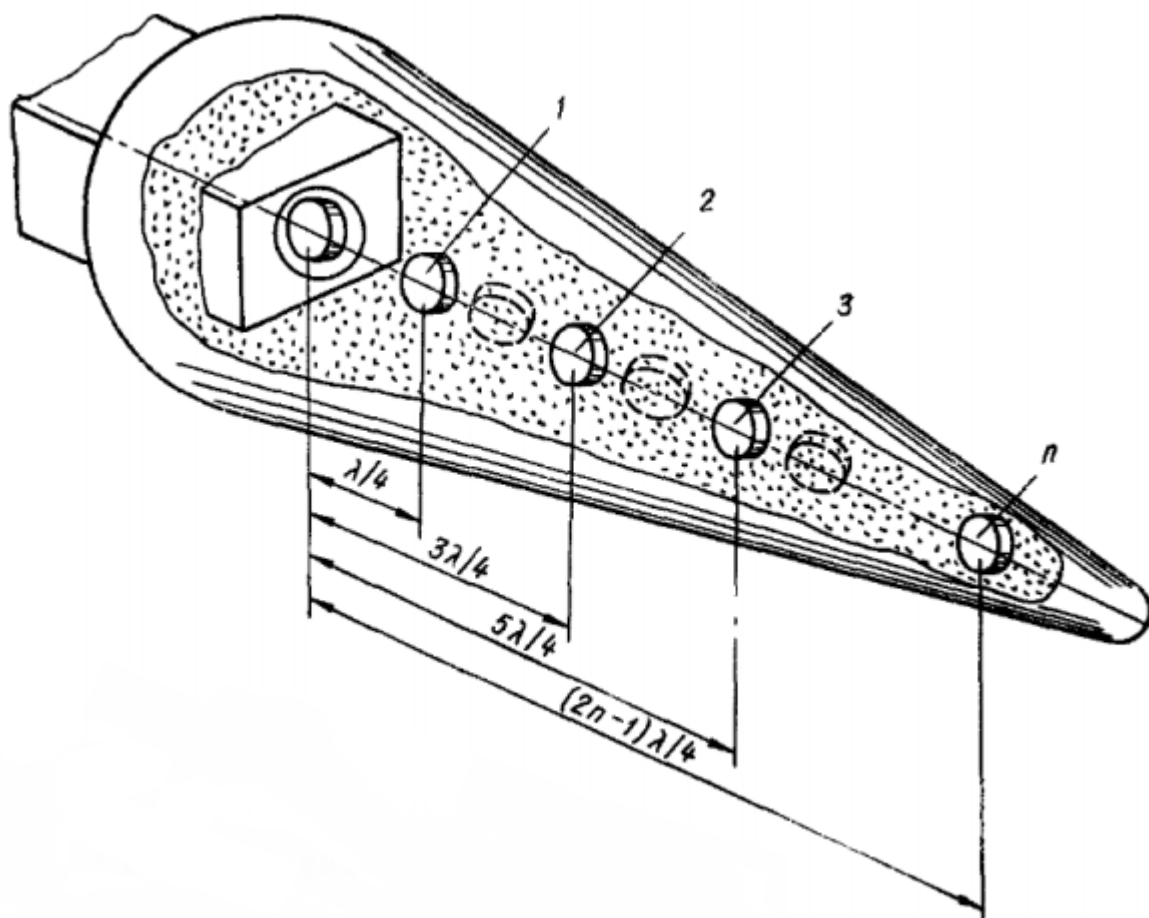


Рис. 1.5. Конструкція лінійної антеною решітки на ДР.

1.4. Діелектричні резонатори з перелаштуванням частоти.

На сьогодні відомо декілька типів ДР, які електрично перелаштовуються за частотою. Між собою вони відрізняються за способами впливу на властивості матеріалів і безпосередньо на НВЧ - поле резонаторів.

Перебудову частоти в ДР можна виконувати таким чином:

- 1) зміною діелектричної проникності ϵ_d діелектрика за рахунок зміни напруженості прикладеного до нього електричного поля;
- 2) включенням в ДР ферритового, щілинного резонатора або резонатора на зосереджених елементах, що електрично перелаштовується (причому ДР і резонатори, що перелаштовуються знаходяться в Perezv'язанном режимі);
- 3) використанням для ДР кераміки, у якій ϵ_d температурнозалежна: зміна температури ДР, наприклад, за допомогою батареї термоелектричних елементів Пельтьє викликає зміну ϵ_d і, як наслідок, зміну резонансної частоти;
- 4) включенням у зовнішнє поле резонатора п'єзокерамічної пластини з укріпленням на ній елементом, що перелаштовується. Переміщати пластину в поле резонатора можна за рахунок прикладання електричної напруги;
- 5) включенням в ДР електрично керованої ємності;
- 6) включенням ферритової нерезонансної вкладки, магнітна проникність якої змінюється керуючим зовнішнім магнітним полем.

Найбільш перспективними матеріалами для ДР, що електронно змінюють налаштування, на НВЧ першого типу є парелектрики з кристалічною структурою типу перовскіту при температурах нижче 80 К. Діелектрики, що володіють високою нелінійністю при нормальній температурі, мають великі діелектричні втрати на

НВЧ, що стримує їх застосування. Їх використовують в якості одного з шарів в двошаровому ДР в поєднанні з високодобротним лінійним діелектриком.

Основна проблема зміни налаштування ДР першим способом - це створення якомога більшої напруженості електричного керуючого поля (наскільки дозволяє електрична міцність матеріалу) в якомога більшому обсязі матеріалу ДР, зберігаючи при цьому високу власну добротність і достатній зв'язок з лінією передачі. Для створення керуючого поля в ДР з нелінійного діелектрика на його торцеві поверхні наносять металеві електроди. Це знижує власну добротність і погіршує умови зв'язку ДР з лінією передачі. Умова найбільшої зміни налаштувань в цьому випадку суперечить умові високої власної добротності. Компромісом в цьому випадку є додаток керуючої напруги до вузького зазору між двома плівковими електродами, розташованими на одній площині ДР. При такому розташуванні електродів перебудова частоти ДР дещо менше, але добротність вище і умови зв'язку ДР з лінією передачі краще.

Зазор між електродами можна розглядати як відрізок щільової лінії, в якому можуть існувати власні коливання за умови, що його довжина кратна половині довжини хвилі в цій лінії (2-й спосіб),

$$\lambda_{\text{щ}} = \lambda_0 \sqrt{2(\varepsilon + 1)^{-1}}. \quad (1.2)$$

Звідси випливає, що власні частоти щілинного резонатора (ЩР):

$$f_{\text{щ}} = nc\sqrt{2(\varepsilon + 1)^{-1}}/2d, \quad (1.3)$$

де d - довжина щілини; $n = 1, 2, 3, \dots$ - число півхвиль, що укладаються по довжині щілини; $c = 3 \cdot 10^8$ м/с.

Щілинний резонатор, утворений електродами на поверхні одношарової структури, можна перебудовувати в набагато більших межах. Добротність такого ДР становить (150-200) на частоті 5 ГГц. Розрахункова частота щілинного ДР нижче експериментальної на 10-15%. Це можна пояснити впливом, що не враховується при розрахунку крайових ємностей на кінцях щілини.

Описані перебудовувані ДР успішно використовують при низьких температурах (менше 90 К), так як матеріали з сильною залежністю $\epsilon_d(E)$ при нормальній температурі мають високий тангенс кута діелектричних втрат ($\operatorname{tg} \delta > 10^{-3}$) на НВЧ. Для таких випадків запропонований [21] тришаровий ДР, що складається з параелектричної плівки товщиною 5...20 мкм на підкладці з високодобротного діелектрика з малою діелектричною проникністю ($\epsilon_n < 10$) і шару високодобротного діелектрика з великою діелектричною проникністю ($\epsilon_d \geq 40$). Таке розташування параелектрику не дозволяє отримати велику зміну налаштування діелектричних типів коливань, якщо товщина параелектричного шару набагато тонше інших шарів. Однак в цьому випадку добротність структури може бути високою.

Так як діелектрична проникність параелектриків і споріднених з ними матеріалів (рутил TiO_2 , перовскит CaTiO_3) залежить від температури, то змінювати налаштування частоти ДР, виготовлених з цих матеріалів, можна, змінюючи температуру ДР (3-й спосіб). Найбільш зручний варіант, це змінювати температуру ДР термоелектричною батареєю на основі елементів Пельтьє. При цьому ДР розміщують на одній з граней батареї через діелектричну пластину з малою діелектричною проникністю і великим коефіцієнтом теплопровідності. Температура, а отже, і діелектрична проникність ДР змінюються при зміні електричного струму, що протікає через елементи Пельтьє. Межі зміни

температури ДР, прийнятні з точки зору витрат енергії на перелаштування, складають $\pm 70^{\circ}\text{C}$ поряд з температурою навколишнього середовища.

Дещо більшу швидкість зміни налаштувань забезпечує електромеханічний (4-й спосіб). ДР змінює налаштування переміщенням поблизу його торцевої поверхні діелектричної пластини, прикріпленої до краю п'єзокерамічної пластини, до якої додано керуючу напругу.

На рис. 1.6. показані конструкції ДР з включеними в них варакторними діодами. На рис. 1.6, а, б діоди включені між металевими контактами (пластинами), що прилегають до діелектрика резонатора. У напівкільцевому резонаторі (рис. 2.26, в) один з виводів діода прилягає безпосередньо до металевого контакту, а другий з'єднаний провідником, шиною (5-й спосіб).

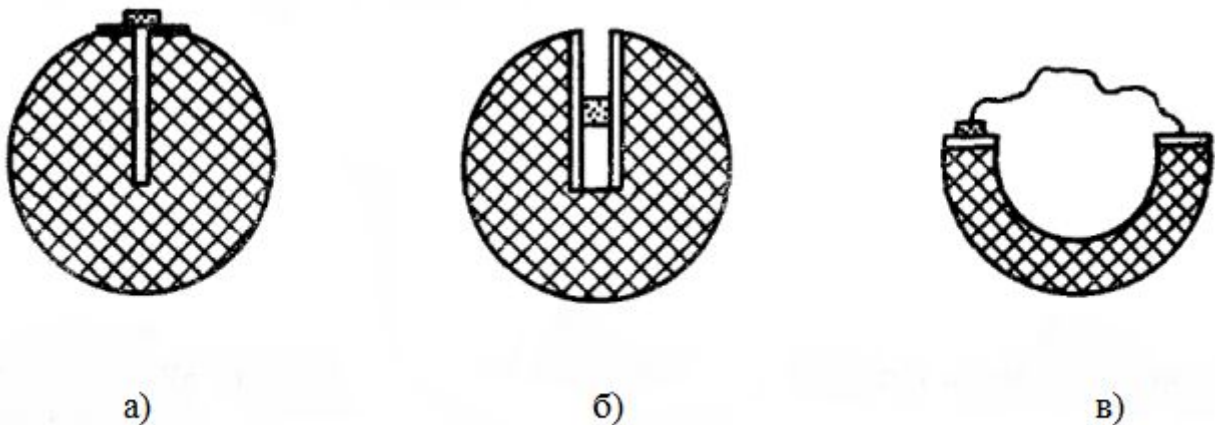


Рис. 1.6. Конструкції циліндричних ДР з включеними у них варакторними діодами.

Добротність і діапазон частотної зміни налаштувань таких ДР залежать від коефіцієнта включення варакторного діода в коливальний контур резонатора.

Причому вимоги щодо збільшення діапазону частотної зміни налаштувань і власної добротності перелаштування ДР є суперечливими, оскільки збільшення діапазону перебудови досягається збільшенням коефіцієнта включення ємності варакторного діода. Це, в свою чергу, призводить до збільшення шунтуючої дії низькодобротним діодом високдобротного ДР.

Шостий шлях перебудови ДР заснований на зміні магнітної проникності складеного резонатора, що має феритове вкладення (або шар), під дією зовнішнього магнітного поля. Широкого поширення він не отримав через громіздкість розмірів системи, що підмагнічується (як у фільтрах на феритових резонаторах).

Висновки по розділу

На даний час висока увага приділена розробці та створення нових високодобротних ДР, на базі яких можлива будова нових функціональних вузлів і пристроїв, які мають великі перспективи застосування в НВЧ техніці.

Завдяки використанню нижчих коливання ДР із матеріалів з високою ϵ та малим $\text{tg}\delta$ є можливість для створення нових поколінь фільтрів, антенних решіток, твердотільних напівпровідникових генераторів із ДР та багато іншого.

При цьому розвиток ДР провокує більш глибоке вивчення фізики явищ, розвиток методів аналізу і проектування, а також пошук та розробку нових конструкцій ДР, заради розширення функціональних можливостей пристроїв на їх основі.

РОЗДІЛ 2: ФАЗООБЕРТАЧІ

Фазообертач - це пристрій, призначений для зміни фази електромагнітних коливань на виході лінії передачі НВЧ щодо фази на її вході, що здійснюється за допомогою зміни електричної довжини цієї лінії. Фазообертачі застосовуються для зміни форми вхідного сигналу, компенсації фазових спотворень, фазової модуляції, вирівнювання електричних довжин ліній передач, створення заданих фазових зсувів сигналів у когерентних радіосистемах (наприклад, в фазованих антенних решітках) та інше. Фазообертачі використовують в НВЧ техніці, наприклад, в системах з великим числом споживачів - для забезпечення необхідного розподілу початкових фаз сигналів, які до них надходять, в фідерах радіосистем - для вирівнювання електричних довжин фідерів, в фазованих антенних решітках - для формування заданої діаграми спрямованості та інших когерентних радіосистемах.[1].

2.1. Різновиди фазообертачів.

Найважливішими параметрами і характеристиками ФО є потужності втрат і керування, гранично допустима робоча смуга частот, швидкодія, залежність фазового зсуву від керуючого впливу, маса, габарити і вартість.

Хвилеводне, коаксіальне, смугове, мікросмугове виконання ФО визначається вибором не тільки фідерного тракту, а й типу випромінювача. У діапазоні НВЧ знайшли широке застосування напівпровідникові і ферритові фазообертачі, які прийнято розподіляти на декілька груп. Серед них виділяють прохідні і відбиваючі, взаємні і невзаємні, дискретні та плавні, з пам'яттю фазового зсуву і без запам'ятовування.

Прохідний ФО - це чотирьохполюсний узгоджений пристрій, що вносить додатковий фазовий зсув від 0 до 360 °. Фазовий зсув при цьому залежить від керуючого сигналу.

Відбиваючий ФО - це двухполюсний пристрій (короткозамкнутий відрізок лінії НВЧ), у якого фаза відбитої хвилі також керуєма. Замикання вихідних клем в прохідному ФО перетворює його у відбиваючий. Відбиваючий ФО може бути перетворений в прохідний за рахунок застосування мостового пристрою.

Взаємний ФО забезпечує однаковий внесений фазовий зсув при прямому і зворотному напрямку поширення хвилі. Невзаємний ФО цією властивістю не володіє. Як правило, він використовує в електрично керованому середовищі невластивий ефект, наприклад ефект Фарадея в фериті. Взаємний відбиваючий ФО з Y-циркулятором утворює прохідний невластивий ФО.

Напівпровідникові та ферритові дискретні ФО володіють елементом пам'яті, тобто зберігають внесений фазовий зсув після зняття керуючого впливу. Аналогові ФО з плавною зміною фази від керуючого сигналу можуть мати дискретність фазування, коли система керування промінем антени пов'язана з ЕОМ.

До теперішнього часу розроблені ФО на різних рівнях потужності, робочі діапазони і розрядності. Феритові ФО на довжинах хвиль коротше 5 см можуть володіти меншими втратами, ніж напівпровідникові, що мають більшу швидкодію і менші масу і габарити. Збільшення розрядності призводить до додаткових втрат, більшої вартості і збільшення потужності управління.

Реалізуються ФО на механічному принципі, на основі діелектриків або феритів, на основі PIN-діодів та ін.

За принципом зміни фазового зсуву під дією зовнішнього сигналу ФО діляться на дві групи:

1) аналогові, фазовий зсув в яких є безперервною функцією керуючого сигналу (напруги або струму);

2) цифрові (дискретні), фазовий зсув в яких задається двійковим кодом:

$$\Delta\varphi = \frac{\pi}{2^{Q-1}} \sum_{k=0}^{Q-1} a_k \cdot 2^k, \quad (2.1)$$

де $\begin{pmatrix} a_0^{(q)} \\ a_1^{(q)} \\ \vdots \\ a_{Q-1}^{(q)} \end{pmatrix} = A^{(q)}$ - Q-мірний вектор, що складається з нулів і одиниць.

Наприклад, якщо $Q = 3$, то $A^{(q)}$ містить вісім векторів та згідно (2.1) може визначити набір фазових зсувів: $0^\circ, 45^\circ, 90^\circ, 135^\circ, 180^\circ, 225^\circ, 270^\circ, 315^\circ$.

В аналогових ФО фазовий зсув змінюється під зовнішнім впливом на магнітну або діелектричну проникність матеріалу. Таким матеріалом може служити ферит або сегнетоелектрик.

Дискретність фаз вписується в структуру команд керуючої ЕОМ, але іноді призводить до деяких помилок в завданні координат променя антени і незначного збільшення рівня бічних пелюсток її діаграми спрямованості, якими, як правило, можна знехтувати.

Основним елементом дискретного ФО є діодний або транзисторний ключ. Використання напівпровідникових приладів в таких схемах засновано на тому, що вони можуть мати два різних стани - в одному струм крізь них не йде, в іншому проходить. Час перемикання напівпровідникових приладів залежить від потужності керованого сигналу і знаходиться в межах 0,05-5 нс.

2.2. Особливості конструкції фазообертачів.

Конструкція фазообертача залежить від діапазону частот, для якого він призначений, меж зміни фази і точності її установки. На низьких частотах і в діапазоні радіочастот (до декількох МГц) в якості фазообертача зазвичай застосовують чотириполіусники, що складаються з резисторів, котушок індуктивності і конденсаторів. Простий фазообертач - фазозсувна ланка. Такий фазообертач зазвичай використовують для створення фіксованого фазового зсуву в межах від 0 до 90. У фазозсувних ланках з зосередженими параметрами зрушення фаз обумовлено дією реактивних елементів, з розподіленими параметрами - кінцевим часом поширення електричного сигналу від входу ланки до її виходу. Більш досконалі фазообертачі, зібрані по схемі з трьох резисторів і одного конденсатора, які забезпечують регульований зсув фаз в межах від 0 до 180° . Застосовуються також транзисторні (або лампові) мостові фазообертачі, до складу яких входить пристрій, що перетворює вхідну напругу в дві напруги, зсунуті по фазі на 180° .

У діапазоні дециметрових і більш коротких хвиль застосовують НВЧ фазообертачі, зібрані з відрізків НВЧ ліній передачі, в яких фазовий зсув здійснюють за допомогою зміни електричної довжини лінії. НВЧ фазообертачі поділяються на регульовані і нерегульовані. До регульованих НВЧ фазообертачів відносяться:

- розсувна секція коаксіальної лінії, регульована за допомогою зміни I ;
- хвилеводні діелектричні НВЧ фазообертачі - відрізок хвилеводу, що містить переміщувану пластину з діелектрика; управління фазовим зсувом в такому фазообертачі засноване на зміні фазової швидкості хвилі і X при зміні положення пластини в хвилеводі;
- стисна секція - відрізок прямокутного хвилеводу, вузькі стінки якого

забезпечені пружними підвісками, що дозволяють змінювати ширину хвилеводу (і тим самим X);

- мостовий НВЧ фазообертач - багатоплечевий пристрій (коаксіальний або хвилеводний), забезпечений двома узгоджено змінюваними по довжині короткозамкненими відрізками лінії передачі (шлейфами), включеними в основну лінію, за якою здійснюється передача енергії НВЧ від генератора до навантаження, послідовно з навантаженням або паралельно йому;
- фазообертачі з напівпровідниковими елементами (такими, як напівпровідникові діоди з р-п-структурою, варикапи), феритовими пристроями, сегнетоелектриками, плазмові. Перспективні НВЧ фазообертачі на р-п-діодах, використовуваних як комутаційні елементи. Діоди дозволяють змінювати фазовий зсув східчасто за допомогою або прямої зміни, або підключенням до лінії (через діоди) набору шлейфів.

Поширені також феритові фазообертачі, робота яких заснована на використанні ефекту Фарадея на НВЧ та явища феромагнітного резонансу в намагніченому фериті.

Феритові фазообертачі поділяються на взаємні, що забезпечують однаковий фазовий зсув для обох напрямків поширення хвилі, і невзаємні, в яких зсув фаз для хвиль, що поширюються в протилежних напрямках, неоднаковий.

Нерегульований фазообертач реалізують у вигляді каліброваного по фазі відрізка лінії передачі, фазовий зсув в якому досягається підбором значення його довжини, розмірів поперечного перерізу (при використанні хвилеводу) або ефективної діелектричної проникності.

Розглянемо декілька прикладів ФО різної конструкції.

1. ФО на стискаємій лінії.

На рис. 2.1. зображено принцип ФО на основі стискаємої лінії. Стискаєма лінія являє собою хвилевід, в середині верхньої і нижньої широких стінок якого прорізані одна над іншою довгі поздовжні щілини, що не випромінюють хвилю H_{10} . До бічних стінок хвилеводу прикладаються механічні зусилля, достатні для того, щоб пружно деформувати хвилевід і зблизити кінці щілини. Широкий розмір перетину хвилеводу a зменшується до величини a' ; відбувається зменшення критичної довжини хвилі.

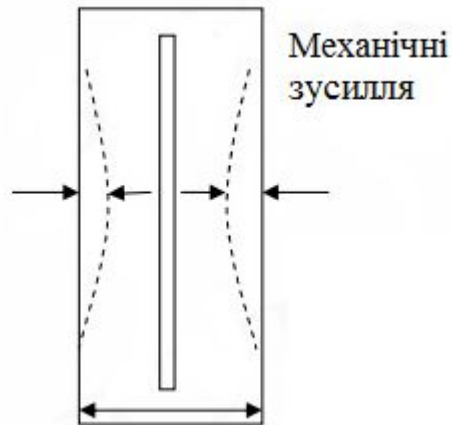


Рис. 2.1. Фазообертач на стискаємій лінії.

$$\lambda_B = \frac{\lambda}{\sqrt{1 - \left(\frac{\lambda}{2a}\right)^2}}, \quad (2.2)$$

то довжина хвилі при стисканні визначається як:

$$\lambda'_B = \frac{\lambda}{\sqrt{1 - \left(\frac{\lambda}{2a'}\right)^2}} . \quad (2.3)$$

Отже, при стисканні хвилеводу, фазова швидкість хвилі зростає, завдяки чому зменшується електрична довжина l/λ_B при незмінній геометричній довжині l . Обираючи досить велику довжину щілини, можливо забезпечити зміну фази не менше ніж на 2π . Недоліком ФО є велика довжина хвилеводу, що стискається.

2. ФО на розсувній лінії.

Цей ФО побудований на щілинному мосту з двома пересувними короткозамикаючими поршнями, які повинні розташовуватися в одній площині, як показано на рис. 2.2.

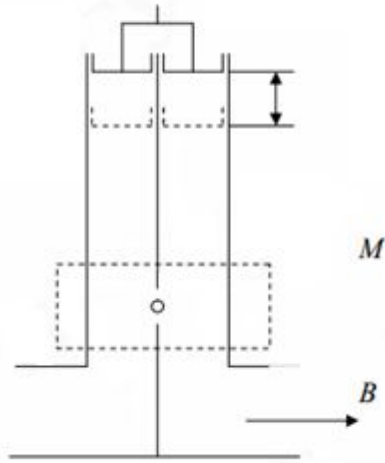


Рис. 2.2. Фазообертач на розсувній лінії.

З урахуванням властивостей щілинного моста передача всієї потужності при збереженні узгодження між входом та виходом відбувається незалежно від положення здвоєних поршней. Фазовий зсув, що отримуємо при зміщенні поршней на відстань ΔL , становить:

$$\Delta\varphi = 2\pi(2\Delta L/\lambda_{\text{в}}). \quad (2.4)$$

Перевагою цього ФО є абсолютний відлік зміни фази, здатність витримувати високі потужності.

3. Діелектричні ФО.

Часткове заповнення хвильоводів однорідним діелектриком використовується для зміни електричної довжини фідера. На рис. 2.3, зображено хвильовод прямокутного перетину, усередині якого паралельно осі z розташована діелектрична пластина. Якщо товщина пластини досить мала або її діелектрична проникність лише не суттєво відрізняється від одиниці, то можна вважати, що в хвильоводі існує той же тип хвиль, що і при вакуумному заповненні. Зміна критичної довжини хвилі і фазової швидкості можна якісно приписати дії деякої ефективної діелектричної проникності, усередненої по поперечному перерізу хвильоводу. Якщо змінювати розмір a' , пересуваючи пластину всередині хвильоводу, то ефективна діелектрична проникність повинна змінюватися в залежності від конфігурації поля всередині хвильоводу. Наприклад, якщо в хвильоводі збуджено хвилю типу H_{10} , при якій електричне поле змінюється уздовж широкої стінки хвильоводу за синусоїдальним законом, то збуджуюча дія пластини буде найменшим, якщо вона притиснута до вузької стінки ($a' \rightarrow 0$). Найбільше збудження може бути отримано при розміщенні пластини в максимумі електричного поля. Фазова швидкість хвилі в цьому випадку повинна бути найменшою. Отже, змінюючи розташування діелектричної пластини всередині хвильоводу, можна плавно змінювати довжину хвилі в ньому λ_v і регулювати електричну довжину лінії.

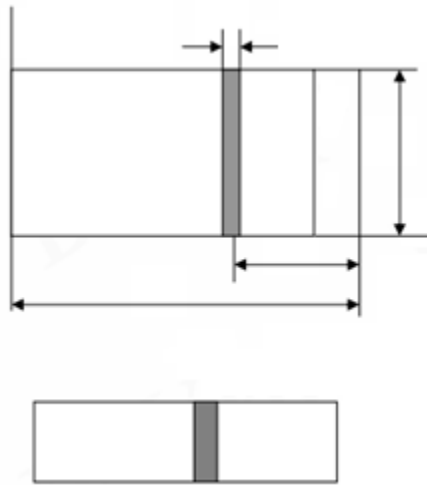


Рис. 2.3. Діелектричний фазообертач.

Електрична довжина ФО на основі ізотропного діелектрика не залежить від напрямку руху енергії по хвилеводу.

Рухливі діелектричні пластини, що розташовуються перпендикулярно осі хвилеводу (рис. 2.3,), використовуються в деяких узгоджувальних елементах в якості трансформаторів повних опорів.

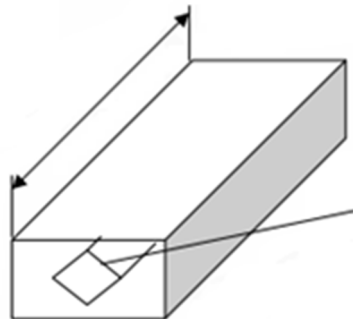


Рис. 2.4. Розташування діелектричної пластини в ФО.

Всередині хвилевода розташовується діелектрична пластина. Кути нахилу обираються близькими до 60° (рис. 2.4). Тоді якщо

$$\varphi_1 = \frac{2\pi}{\lambda_B} L, \quad (2.5)$$

то при внесенні пластини:

$$\varphi_2 = \frac{2\pi}{\lambda'_B} L, \quad (2.6)$$

де $\lambda'_B = \lambda_B / \sqrt{\varepsilon_{эф}}$, і фазовий зсув визначається як:

$$\Delta\varphi = \varphi_2 - \varphi_1 = \frac{2\pi L}{\lambda_B} (\sqrt{\varepsilon_{эф}} - 1). \quad (2.7)$$

В якості діелектричного наповнювача хвилевода може застосовуватись електронно-іонна плазма. Якщо не враховувати зіткнення електронів з молекулами газів, то за відсутності постійного магнітного поля плазма веде себе як ізотропний діелектрик з відносною діелектричною проникністю $\varepsilon = 1 - (Ne^2/m\varepsilon_0 \omega^2)$, де N - концентрація електронів в плазмі, ω - кругова частота коливань, e і m - заряд і маса електрона. Плазма може бути створена всередині хвилеводу шляхом розряду в газі на постійному або на змінному струмі. Концентрація електронів N при цьому залежить від величини струму, що проходить крізь розряд, змінюючи який, можна плавно керувати величиною ε плазми, а значить, змінювати критичну довжину хвилі в лінії.

2.3. Параметри фазообертачів.

Серед основних параметрів фазообертачів виділяють:

- Робочий діапазон частот. Оскільки фазообертачі працюють на різних частотах, та в різних пристроях, при виборі конкретної моделі необхідно відштовхуватись від поставленої мети. Так, наприклад, в своїй роботі я розглядаю фазообертачі на ДР, що працюють в діапазоні частот 4-6 ГГц.
- Максимальний керуємий фазовий зсув. Суть керованого фазообертача полягає в керуванні частотою. Тому важливою характеристикою слід виділити максимально керуємий фазовий зсув.
- Потужність втрат. Фазообертачі частіше за усе виступають в якості частини складної системи, або приладу. Тому їх продуктивність зростає при зменшенні втрат за потужністю.
- Швидкодія. Швидкість завжди виступає однією чи не важливішою характеристикою при виборі складових приладів. Оскільки швидкість кожної зі складових впливає на швидкість процесу або приладу в цілому.
- Коефіцієнт стоячої хвилі. Співвідношення значень напруженості електричного поля у максимумі і мінімумі стоячої хвилі.
- Габарити. В зв'язку з прямуванням новітніх технологій до мінімізацій приладів, без втрат їх функціональності, зазвичай обирають складові з меншими габаритами.
- Вартість. Ще однією не мало важливою характеристикою фазообертачів є ціна. Оскільки вона є показником для виробників. Чи є доцільним використовувати саме цю модель, а не яку-небудь іншу.

Висновки до розділу

Фазообертачі розподіляють на різні групи, в залежності від їх функціональних можливостей, принципів роботи та елементарної бази, на основі якої вони працюють. Найбільшого застосування набули ФО на базі ферритових стрижнів та діелектриків. У зв'язку із значним розвитком в напрямі ДР, останні отримали великий успіх. Вони відрізняються великою добротністю, термостабільністю та швидкодією.

РОЗДІЛ 3: ФАЗООБЕРТАЧІ НА ОСНОВІ РЕЗОНАНСНИХ СТРУКТУР

3.1. Фазобертачі на основі тонких діелектричних резонаторів

Зміна розміру повітряного зазору ДКР призводить не тільки до зсуву АЧХ коефіцієнтів відбиття і передачі відрізка лінії, що містить ДКР, але і до зміни їх фазочастотних характеристик. Цей принцип може бути покладений в основу створення керованих фазообертачів на ДКР. Найпростіший фазообертач відбивного типу реалізується при вмиканні ДКР у короткозамкнуту лінію передачі НВЧ. Розглянемо відрізок прямокутного металевого хвилеводу в який на відстані X_0 від площини короткого замикання розташований ДКР[2].

Розглянемо проходження сигналу крізь хвилеводну секцію з ДКР, для того, щоб визначити ФЧХ такого фазообертача. Цей ДКР має бути розташований на деякій відстані X_0 від площини короткого замикання. Коефіцієнт відбиття такої лінії можна представити у вигляді:

$$\Gamma = \frac{1-K-Ke^{-j2\beta X_0+j\xi}}{1+K+Ke^{-j2\beta X_0+j\xi}}, \quad (3.3)$$

де Γ - коефіцієнт відбиття, що залежить від частоти ω ;

$\beta = (2\pi)/\lambda$ - повздовжнє хвильове число;

K -коефіцієнт зв'язку резонатора з хвилеводом;

ξ - узагальнена розстройка, що визначається виразом:

$$\xi = Q\left(\frac{\omega}{\omega_0} - \frac{\omega_0}{\omega}\right), \quad (3.4)$$

де Q - добротність резонатора.

Тоді для розрахунку ФЧХ маємо співвідношення :

$$\varphi = \arctg \frac{2K(\sin(2\beta X_0) + \xi \cos(2\beta X_0) + \xi)}{1 - 2K^2 - 2K^2 \cos(2\beta X_0) + \xi^2}, \quad (3.5)$$

де φ - фаза.

Для зручності скористаємось конструкцією, при якій відстань від площини короткого замикання $X_0 = (n\lambda)/2$. Це дає змогу спростити попередню формулу до вигляду:

$$\varphi = \arctg \frac{4K\xi}{1 - 4K^2 + \xi^2}. \quad (3.6)$$

Розглянемо прямокутний металевий хвелевод перетином 58x25 мм, з циліндричним хвелеводом ДКР ($\varepsilon \approx 40$, $D = 8.2$ мм, $g = 2.2$ мм)[2]. Розташуємо циліндричний хвелевод на відстані $X_0 = (n\lambda)/2$ від площини короткого замикання, де λ - довжина нижчого типу хвилі лінії, а n - натуральне число, при різних розмірах повітряного зазору. Розрахувавши частоти [2] для даного хвелеводу за формулою (3.6), маємо змогу побудувати ФЧХ коефіцієнта відбиття його відрізка (Рис. 3.1., 3.2.).

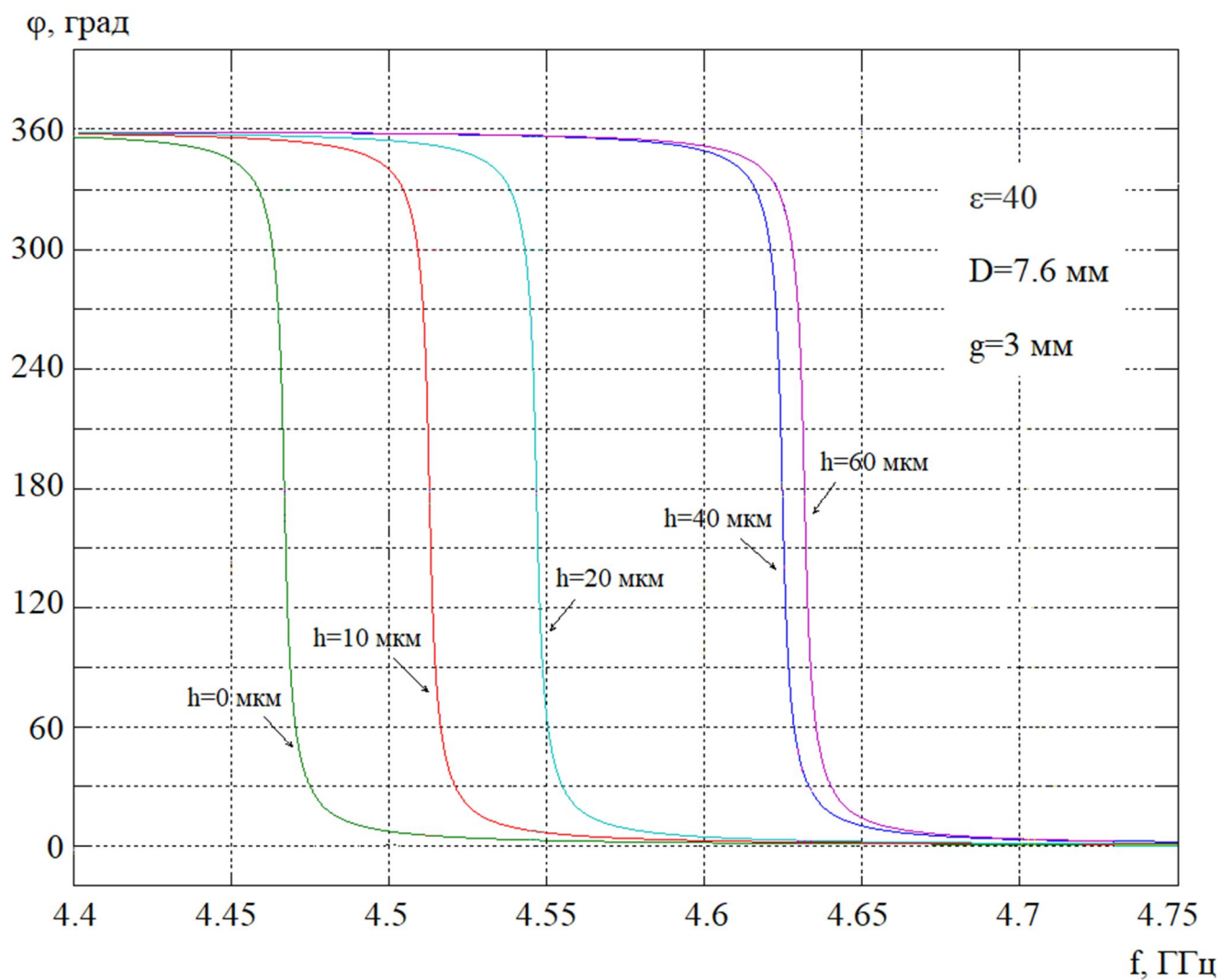


Рис. 3.1. Фазочастотні характеристики коефіцієнту відбиття короткозамкнутого прямокутного металічного хвилевода, що містить циліндричний КДР (АЛТК)

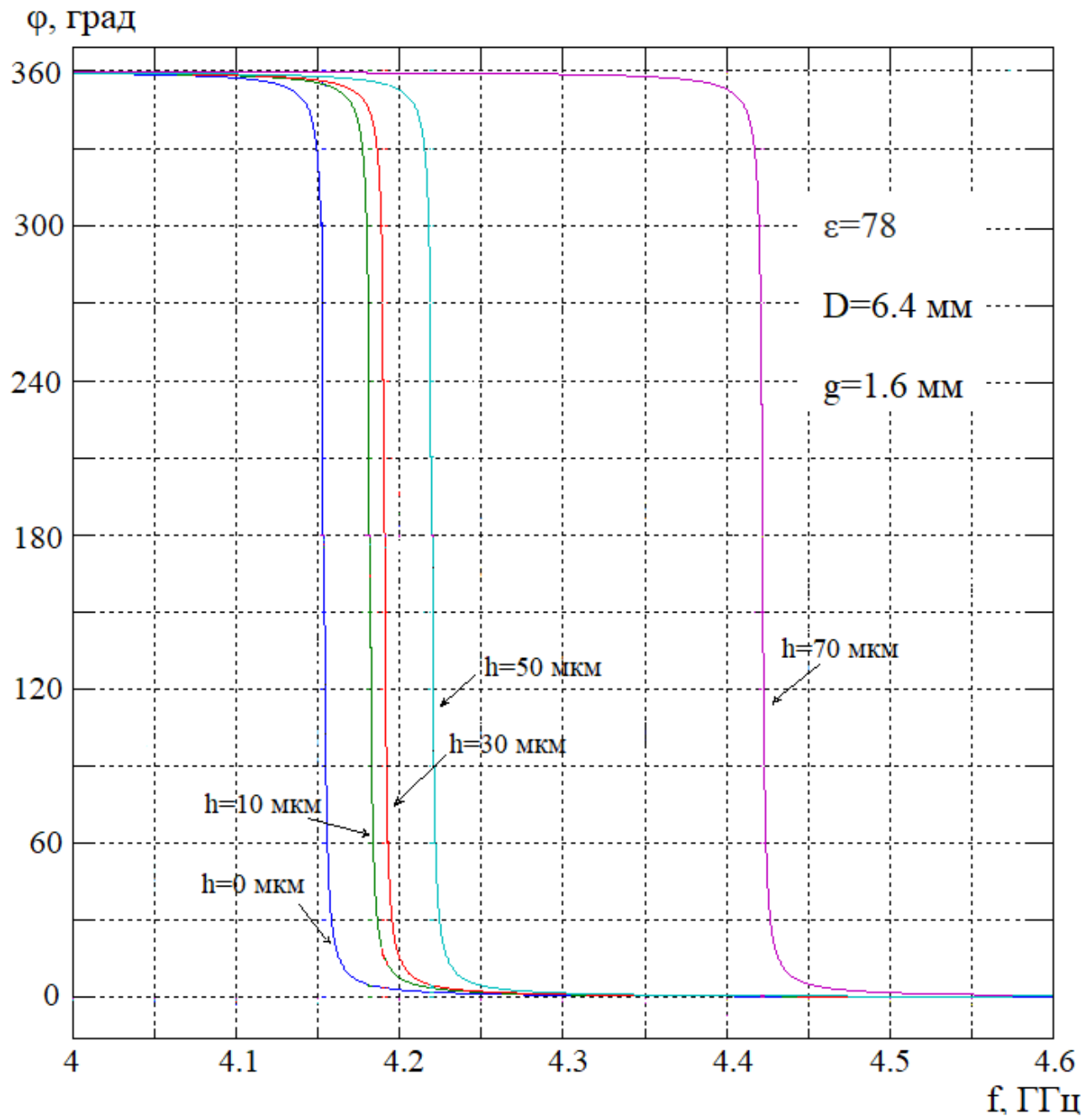


Рис. 3.2. Фазочастотні характеристики коефіцієнту відбиття короткозамкнутого прямокутного металічного хвилевода, що містить циліндричний КДР (ТБНС)

Проаналізувавши отриману ФЧХ, маємо можливість зробити висновок, що переміщення складових частин ДКР, одна відносно другої, призводить до зсуву ФЧХ і зміни фази відбитого чигналу на одній із робочих частот.

Побудуємо залежність зсуву фази відбитого сигналу від відстан між складовими частинами резонатора на частоті $f=4,513$ ГГц. Отриману залежність зображено на рис. 3.3.

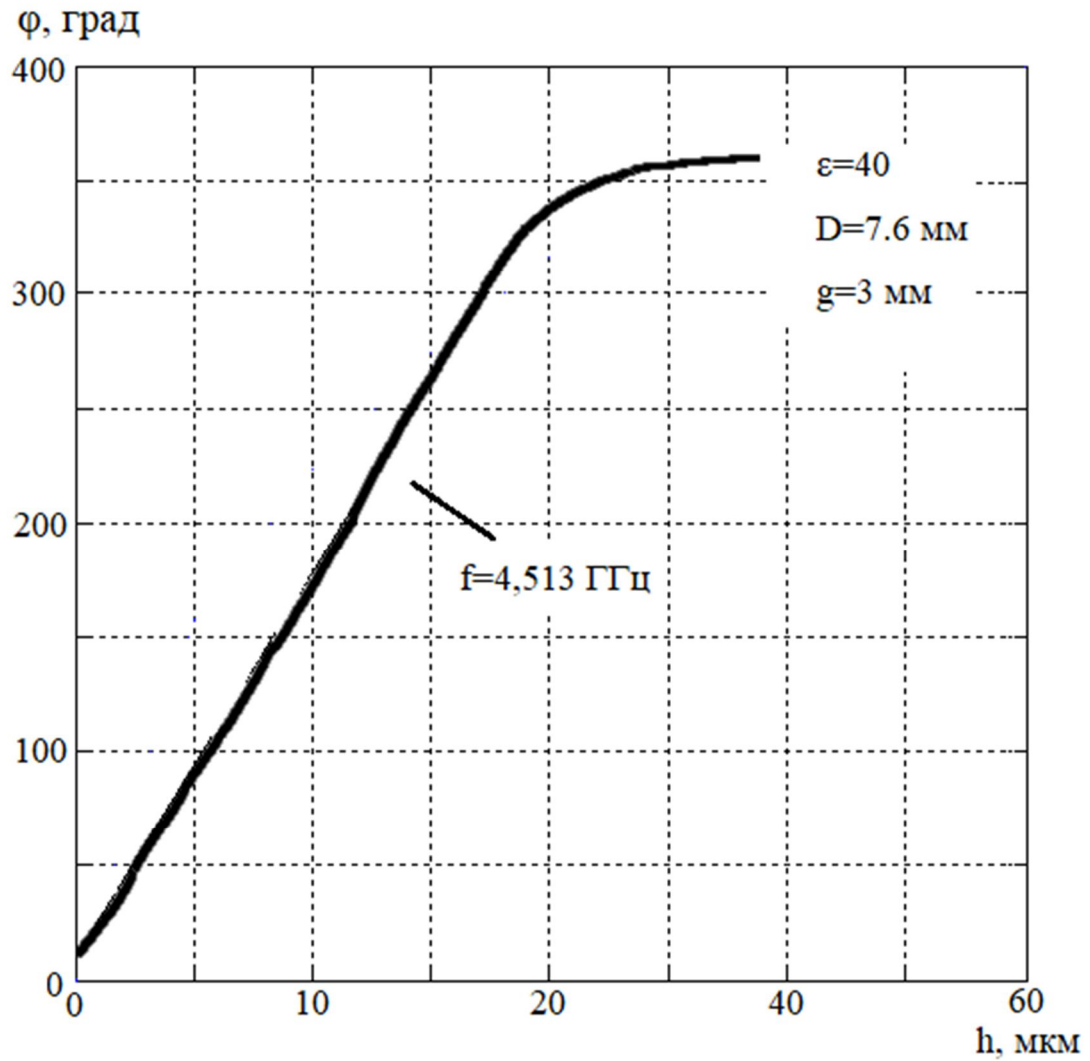


Рис. 3.3. Залежність зсуву фази коефіцієнта відбиття короткозамкнутого прямокутного металічного хвильовода, що містить циліндричний КДР (АЛТК), від відстані до другого металічного дзеркала

Побудуємо залежність зсуву фази відбитого сигналу від відстан між складовими частинами резонатора на частоті $f=4,176$ ГГц. Отриману залежність зображено на рис. 3.4.

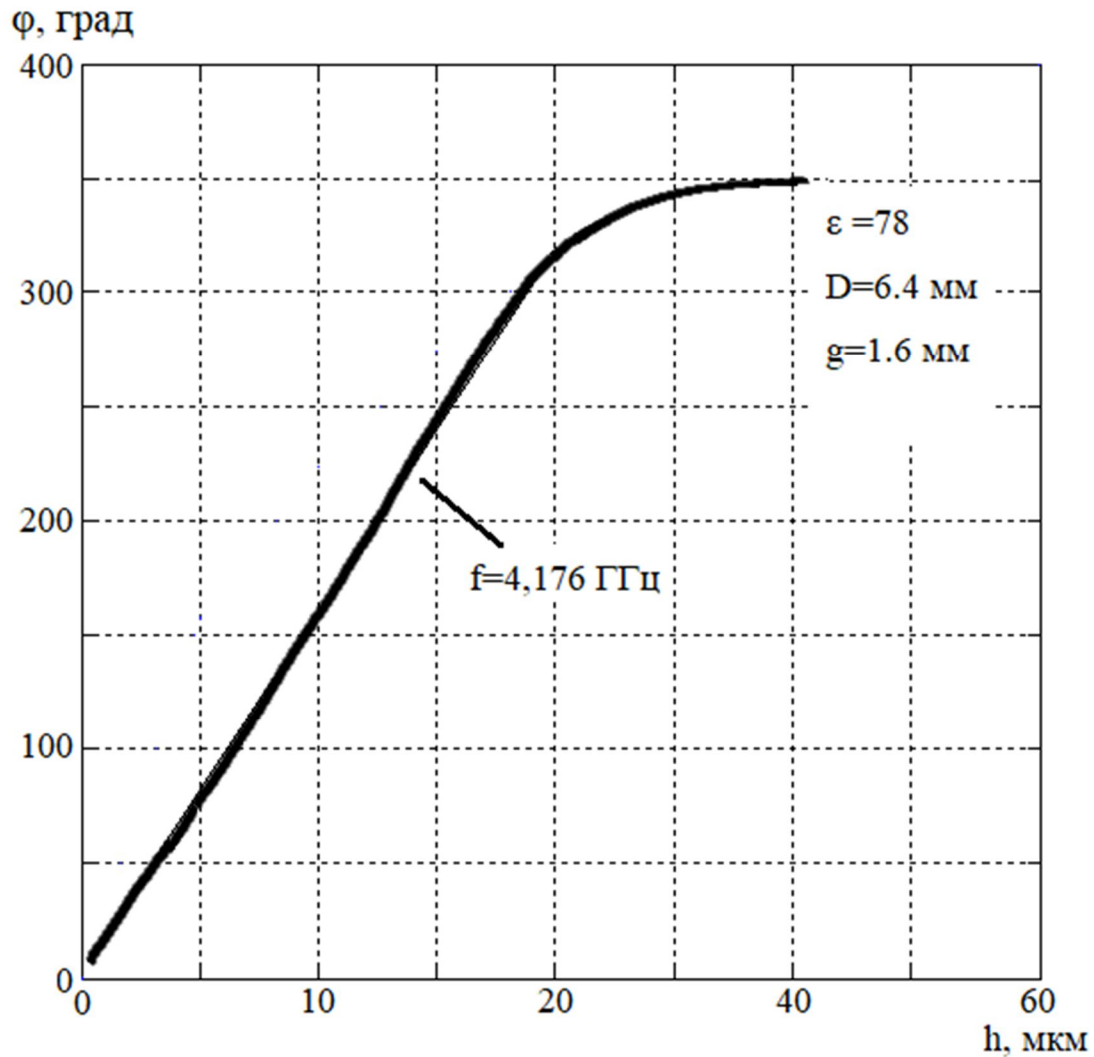


Рис. 3.4. Залежність зсуву фази коефіцієнта відбиття короткозамкнутого прямокутного металічного хвильовода, що містить циліндричний КДР (ТБНС), від відстані до другого металічного дзеркала

Зазначена конструкція має високу чутливість фази до зміни повітряного зазору в ДКР.

3.2. Керовані фазообетачі на основі комбінованих діелектричних резонаторів та повздовжнім повітряним зазором

Зазначена вище конструкція має високу чутливість фази до зміни повітряного зазору в ДКР, це дає змогу використовувати п'єзоелектричні перетворювачі для керування фазою відбитого сигналу [10].

На рис. 3.5. зображено одну з можливих конструкцій фазообертача з п'єзоелектричним керуванням. Особливість цієї схеми полягає в розміщенні ДКР (1) у відрізку короткозамкнутого прямокутного хвильовода (2) таким чином, що одна його частина встановлена з можливістю переміщення за рахунок з'єднання її через шток (3) з п'єзоелектричним перетворювачем (4), що розташований поза НВЧ трактом. Широка стінка хвильовода виконує роль другого провідного дзеркала.

Відстань між ДКР і площиною короткого замикання обирається кратною половині довжини хвилі нижчого типу хвиль прямокутного хвильовода на робочій частоті фазообертача, рівній резонансній частоті ДКР при початковій нульовій відстані між складовими частинами резонатора. При зміні розміру повітряного зазору змінюється фаза сигналу. Це дозволяє отримувати фазові зрушення відбитого сигналу в залежності від керуючої напруги, що прикладається до п'єзоелектричного елемента. На рис. 3.6 приведена керуюча характеристика такого фазообертача в 10-сантиметровому діапазоні довжин хвиль.

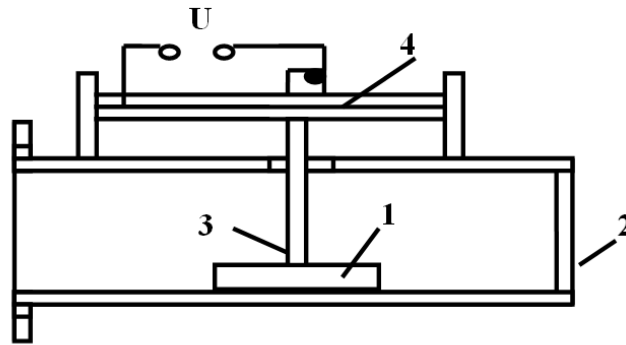


Рис. 3.5. Схематичне зображення конструкції фазообертача з п'єзоелектричним управлінням:

- 1 - КДР;
- 2 - відрізок прямокутного хвилевода ;
- 3 - шток;
- 4 - п'єзоелектричний перетворювач.

У порівнянні з іншими електромеханічними конструкціями, фазообертачі на основі тонких діелектричних резонаторів потребують менших керуючих напруг при менших розмірах п'єзоелектричних перетворювачів, що підвищує їх швидкодію. Нижча енергоємність таких фазообертачів дозволяє зменшити потужність керуючих кіл.

Беручи до уваги вище зазначене, маємо можливість зробити висновок, що конструкції хвилеводних фазообертачів на основі тонких діелектричних резонаторів мають достатньо переваг для практичного застосування при створенні сучасних систем зв'язку.

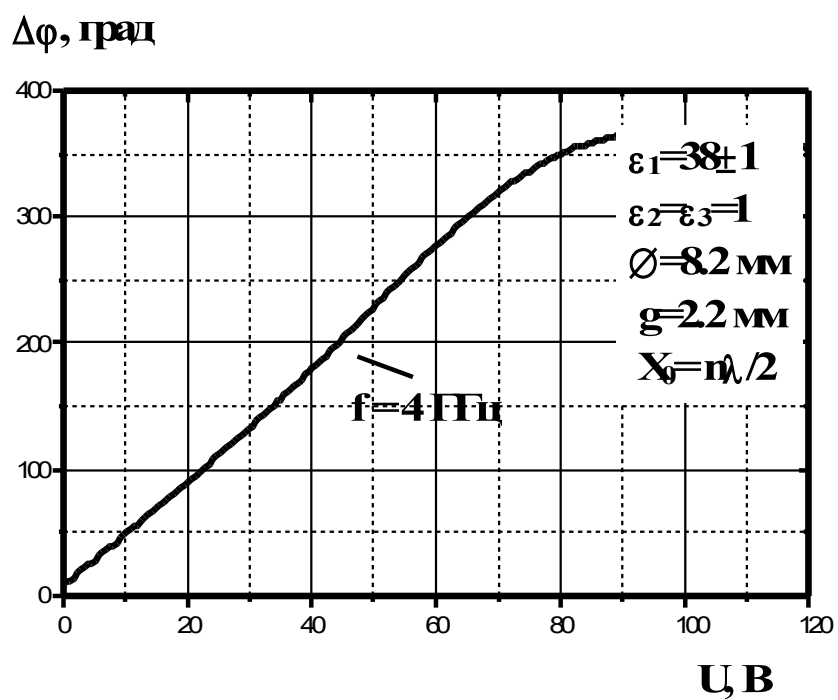


Рис. 3.6. Керуюча характеристика фазообертача на основі тонкого діелектричного резонатора [2] в сантиметровому діапазоні довжин хвиль

Висновки по розділу

За рахунок високої чутливості резонансних систем на основі тонких діелектричних резонаторів до взаємного переміщення частин системи може бути реалізований фазовий зсув до 360^0 при керуючій напрузі до 90 В.

Зміщення фазочастотних характеристик коефіцієнтів проходження і відбиття резонансних структур, при зміні відстані між частинами таких структур, дозволяє створювати на їх основі керовані фазообертачі резонансного типу з електромеханічним керуванням фазою.

РОЗДІЛ 4: РОЗРОБЛЕННЯ СТАРТАП ПРОЕКТУ

4.1. Опис ідеї проекту

Таблиця 4.1. Опис ідеї стартап-проекту

Зміст ідеї	Напрямки застосування	Вигоди для користувача
Ідея полягає в конструкції фазообертача з покращеними характеристиками	<p style="text-align: center;">1. НВЧ техніка для систем з великим числом споживачів (мобільний зв'язок).</p> <p style="text-align: center;">2. НВЧ техніка для військового зв'язку.</p>	Покращення характеристик та зменшення розмірів.

Таблиця 4.2. Визначення сильних, слабких та нейтральних характеристик ідеї проекту

№	Техніко-економічні характеристики ідеї	(потенційні) товари/концепції конкурентів				W (слабка сторона)	N (нейтральна сторона)	S (сильна сторона)
		Проект	Конку-рент 1	Конку-рент 2	Конку-рент 3			
1.	Призначення	НВЧ техніка мобільного, військового зв'язку.	НВЧ техніка мобільного, військового зв'язку.	НВЧ техніка мобільного, військового зв'язку.	НВЧ техніка мобільного, військового зв'язку.		+	
2.	Розміри	Має менші розміри у порівнянні з конкурентами.	Має звичайні розміри	Має звичайні розміри	Має звичайні розміри			+
3.	Надійність	Використання надійної високо добротної системи	Використання надійної, при цьому дорожчої системи	-	-			+

4.	Безпека	Безпечно	Безпечно	Безпечно	Безпечно		+	
5.	Економічні	180 у.о.	540 у.о.	250 у.о.	310 у.о.			+

4.2. Технологічний аудит ідеї проекту

Таблиця 4.3 – Технологічна здійсненність ідеї проекту

№	Ідея проекту	Технології її реалізації	Наявність технологій	Доступність технологій
1.	Мінітюаризація апаратури	Синтез кераміки АЛТК, ТБНС	Наявна	Доступна
		Зразки циліндричної форми виготовляють методом пресування	Наявна	Доступна

4.3. Аналіз ринкових можливостей запуску стартап-проекту

Таблиця 4.4 – Попередня характеристика потенційного ринку стартап-проекту

	Показники стану ринку (найменування)	Характеристика
1.	Кількість головних гравців, <i>од</i>	4
2.	Загальний обсяг продаж, <i>грн/ум.од</i>	~ 110000 у.о.

3.	Динаміка ринку (якісна оцінка)	Зростає
4.	Наявність обмежень для входу (вказати характер обмежень)	Немає
5.	Специфічні вимоги до стандартизації та сертифікації	Немає
6.	Середня норма рентабельності в галузі (або по ринку), %	~ 25 %

Середня рентабельність близько 25%, ринок можна вважати прибутковим.

Таблиця 4.5 – Характеристика потенційних клієнтів стартап-проекту

№	Потреба, що формує ринок	Цільова аудиторія (цільові сегменти ринку)	Відмінності у поведінці різних потенційних цільових груп клієнтів	Вимоги споживачів до товару
1.	Необхідність змінювати фазу переданого сигналу	Компанії зв'язку, військові програми.	Поведінку клієнта формують низька ціна, висока надійність	Компактність, надійність.

Таблиця 4.6 – Фактори загроз

№	Фактор	Зміст загрози	Можлива реакція компанії
1.	Проблема наявності висококваліфікованих спеціалістів	Потрібні люди з певним освітнім навиком	Набір персоналу в науково-дослідних установах
2.	Ресурсна проблема	Проблема виготовлення продукту	Пошук нових ринків покупки ресурсів

Таблиця 4.7 – Фактори можливостей

№	Фактор	Зміст можливості	Можлива реакція компанії
1.	Конкуренція	Розробка нового товару з кращими властивостями, зниження цін	Удосконалення товару
2.	Попит	Стійкий попит, клієнти зацікавлені в інноваціях	Активне просування товару

Таблиця 4.8 – Ступеневий аналіз конкуренції на ринку

Особливості конкурентного середовища	В чому проявляється дана характеристика	Вплив на діяльність підприємства (можливі дії компанії, щоб бути конкурентоспроможною)
1. Вказати тип конкуренції:- олігополія	На ринку присутня невелика кількість фірм, які займаються випуском НВЧ фазообертачів	Підвищувати якість товару за рахунок використання передових технологій та залучення кваліфікованого персоналу
2. За рівнем конкурентної боротьби національний	Більшість конкурентних фірм закордонні	Налогодження експорту продукту за рахунок посередників

3. За галузевою ознакою: - внутрішньогалузева	Економічна боротьба між різними товаровиробниками, які діють в одній галузі економіки, виробляють і реалізують однакові товари, що задовольняють одну й ту саму потребу, але мають відмінності у виробничих затратах, якості, ціні, тощо	Дослідження продуктів конкурентів, швидка реакція на покращення товарів конкурентів
4. Конкуренція за видами товарів:- товарно-видова	Конкуренція між товарами одного виду	Покращення якості товару
5. За характером конкурентних переваг:- не цінова	Ціна на продукт достатня, необхідно підвищити якість, зменшити кількість браку	Продавати товар за достатньою ціною
6. За інтенсивністю: - не марочна	Боротьба носить явно виражений марочний характер, велике значення набуває брендинг	Реклама товару, створення символіки продукту

Таблиця 4.9 – Аналіз конкуренції в галузі за М. Портером

Складові аналізу	Прямі конкуренти в галузі	Потенційні конкуренти	Постачальники	Клієнти	Товари-замінники
	“БЕЛЛА”, “Микран”	-	Товар продається безпосередньо розробниками	Вимоги до якості	Замінників немає
Висновки:	Інтенсивність висока, бо товар є складним в виготовленні	-	Постачальники не диктують умови роботи на ринку	Продукт має бути якісним та дешевим	Обмежень немає

Входження на ринок можливе завдяки властивостям продукту.

Таблиця 4.10 – Обґрунтування факторів конкурентоспроможності

№	Фактор конкурентоспроможності	Обґрунтування (наведення чинників, що роблять фактор для порівняння конкурентних проектів значущим)
1.	Ціна	Ціна нижче за ціну конкурентів
2.	Терміни та масовість виробництва	Вчасні поставки продукту та зниження ціни
3.	Достатні робочі характеристики	Властивості виробу не гірші за властивості конкурентних виробів

Таблиця 4.11 – Порівняльний аналіз сильних та слабких сторін проекту

№	Фактор конкурентоспроможності	Бали 1-20	Рейтинг товарів-конкурентів у порівнянні з нашим проектом						
			-3	-2	-1	0	1	2	3
1.	Ціна	3				+			
2.	Терміни та масовість виробництва	5					+		
3.	Достатні робочі характеристики	0				+			

Таблиця 4.12 – SWOT – аналіз стартап-проекту

Сильні сторони: гарні робочі характеристики, надійність	Слабкі сторони: ціна.
Можливості: зниження витрат на виробництво, покращення властивостей	Загрози: низька кількість якісних кадрів на ринку, поява конкурентів

Таблиця 4.13 – Альтернативи ринкового впровадження стартап-проекту

№	Альтернатива (орієнтовний комплекс заходів) ринкової поведінки	Ймовірність отримання ресурсів	Строки реалізації
1.	Дослідження поведінки споживачів, пошук наукових ресурсів, розробка програмного забезпечення, рекламна діяльність, взаємодія з органами державної влади для перевірки	70 %	2 роки
2.	Дослідження поведінки споживачів, пошук інвесторів, пошук наукових ресурсів, створення програмного забезпечення, тестування	60 %	3 року

Обрано альтернативу № 1.

4.4. Розроблення ринкової стратегії проекту

Таблиця 4.14 – Вибір цільових груп потенційних споживачів

№	Опис профілю цільової групи потенційних клієнтів	Готовність споживачів сприйняти продукт	Орієнтовний попит в межах цільової групи (сегменту)	Інтенсивність конкуренції в сегменті	Простота входу у сегмент
1.	Державні установи	Готові	Високий	Висока	Середня
2.	Приватні підприємства	Готові	Високий	Середня	Середня
Які цільові групи обрано: обрано цільову групу №1 та №2.					

Таблиця 4.15 – Визначення базової стратегії розвитку

№	Обрана альтернатива розвитку проекту	Стратегія охоплення ринку	Ключові конкурентоспроможні позиції відповідно до обраної альтернативи	Базова стратегія розвитку*
1.	1	Вибір дешевого аналогу з аналогічними характеристиками	Досягнення заданих характеристик товару при використанні більш дешевих підходів	Стратегія лідерства на витратах

2.	2	Вибір дешевого аналогу	Зниження рівня властивостей для того щоб знизити ціну	Стратегія диференціації
----	---	------------------------	---	-------------------------

Обрано стратегію диференціації.

Таблиця 4.16 – Визначення базової стратегії конкурентної поведінки

№	Чи є проект «першопрохідцем» на ринку?	Чи буде компанія шукати нових споживачів, або забирати існуючих у конкурентів?	Чи буде компанія копіювати основні характеристики товару конкурента, і які?	Стратегія конкурентної поведінки
1.	Ні	Два варіанти	Ні	Заняття конкурентної ніші

Таблиця 4.17 – Визначення стратегії позиціонування

№	Вимоги до товару цільової аудиторії	Базова стратегія розвитку	Ключові конкуренто спроможні позиції власного стартап-проекту	Вибір асоціацій, які мають сформувати комплексну позицію власного проекту (три ключових)
1.	Якість	Лідерства на витратах	Висока якість	Оптимальне співвідношення ціна/якість, покращення існуючих характеристик.
2.	Точність	Лідерства на витратах	Висока точність	
3.	Ціна	Лідерства на витратах	Низька ціна	

4.5. Розроблення маркетингової програми стартап-проекту

Таблиця 4.18 – Визначення ключових переваг концепції потенційного товару

№	Потреба	Вигода, яку пропонує товар	Ключові переваги перед конкурентами (існуючі або такі, що потрібно створити)
1.	Низька ціна	Найнижча ціна на ринку	Найнижча ціна на ринку
2.	Висока якість	Висока якість	Висока якість
3.	Низький втрати	Одні із найкращих властивостей	Низький тангенс кута діелектричних втрат

Таблиця 4.19 – Опис трьох рівнів моделі товару

Рівні товару	Сутність та складові		
I. Товар за задумом	Фазообертач на основі тоних діелектричних резонаторів		
II. Товар у реальному виконанні	Властивості/характеристики	М/Нм	Вр/Тх /Тл/Е/Ор
	1. Сумістність с сучасними НВЧ системами.	М	
	2. Низька ціна 150 у.о.	М	
III. Товар із підкріпленням	До продажу: договір, надання кредиту.		
	Після продажу: доставка, підтримка.		

Таблиця 4.20 – Визначення меж встановлення ціни

№	Рівень цін на товари замітники	Рівень цін на товари-аналоги	Рівень доходів цільової групи споживачів	Верхня та нижня межі встановлення ціни на товар/послугу
1.	-	200 – 800 у.о.	7000 у.о. і вище	150 – 500 у.о.

Таблиця 4.21 – Формування системи збуту

№	Специфіка закупівельної поведінки цільових клієнтів	Функції збуту, які має виконувати постачальник товару	Глибина каналу збуту	Оптимальна система збуту
1.	Найкращі характеристики за найнижчу ціну	Налагодження контакту з клієнтами, надання достовірної інформації про характеристики	Канал нульового рівня	Виробник безпосередньо збуває продукцію покупцям

Таблиця 4.22 – Концепція маркетингових комунікацій

№	Специфіка поведінки цільових клієнтів	Канали комунікацій, якими користуються цільові клієнти	Ключові позиції, обрані для позиціонування	Завдання рекламного повідомлення	Концепція рекламного звернення
1.	Вибір найкращого продукту	Прямі - канал комунікації,	Якість, ціна, низька кількість браку	Надання повної інформації про переваги виробу	Висока надійність та якість

Висновки до розділу

В данному розділі було розглянуто принцип побудови та розроблення стартап проекту для фазообертача НВЧ на основі тонких діелектричних резонаторів.

Отриманий результат є конкурентоспроможним до існуючих і тому може впроваджуватись на ринок.

ВИСНОВКИ

Застосування діелектричних резонаторів в електроніці НВЧ сприяє створенню високоефективних резонансних пристроїв. Пристрої на основі діелектричних резонаторів мають компактні розміри, високу добротність і порівняно низьку ціну.

Одним з перспективних глянхів розвитку електроніки НВЧ є використання тонких діелектричних резонаторів.

За рахунок високої чутливості резонансних систем на основі тонких діелектричних резонаторів до взаємного переміщення частин системи може бути реалізований фазовий зсув до 360^0 при керуючій напрузі до 90 В.

Зміщення фазочастотних характеристик коефіцієнтів проходження і відбиття резонансних структур, при зміні відстані між частинами таких структур, дозволяє створювати на їх основі керовані фазообертачі резонансного типу з електромеханічним керуванням фазою.

СПИСОК ВИКОРАСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Безбородов Ю.М., Нарытник Т.Н., Фёдоров В.Б. Фильтры СВЧ на диэлектрических резонаторах. – Киев: Техника, 1989.-184 с.
2. Татарчук Д.Д. Комбіновані структури НВЧ з діелектричним резонансом Е-типу. – Київ, 2000.-175 с.
3. Кузнецов В.А., Лерер А.М., Михалевский В.С. Резонансные частоты дисковых диэлектрических резонаторов// Радиотехника и электроника.-1984.-N 11.-С.2124-2128.
4. Ильченко М.Е., Кудинов Е.В. Ферритовые и диэлектрические резонаторы СВЧ. - Киев:Изд. Киевского университета, 1973.-175с.
5. Состояние и перспективы применения миниатюрных диэлектрических резонаторов в радиоэлектронике. Часть I. Параметры миниатюрных диэлектрических резонаторов на СВЧ и методы их расчета/ Л.В. Алексейчик, И.И. Бродуленко, В.М. Геворкян и др.// Обзоры по электронной технике. Сер. Электроника СВЧ.- М.:ЦНИИ "Электроника".-1981.-Вып.13(832).-96с.
6. Возможности электромеханической перестройки колебательных систем СВЧ/ Ю.И. Якименко, С.А. Кравчук, Т.Н. Нарытник, С.А. Селиванов// Изв. вузов СССР. Сер. Радиоэлектроника.- 1988.-N10.-С.50-56.
7. Пьезоэлектрическая перестройка частоты диэлектрических резонаторов КВЧ/ С.А. Кравчук, Т.Н. Нарытник, Ю.И. Якименко, С.А. Селиванов// Электронная техника. Сер.Электроника СВЧ.- 1988.- Вып.7(411).-С.6-10.
8. Грабовски Б. Краткий справочник по электронике. – Москва, 2004. – 418 с.
9. Вендик О., Парнес М. Фазовращатели сканирующих антенн для радаров обзора территорий // Беспроводные технологии. – 2007. – № 3. – С. 26-28.
10. Бутко В.И., Прокопенко Ю.В. Фазовращатели миллиметрового диапазона с электромеханическим управлением//Актуальные проблемы в области

- радиоэлектроники, автоматики, вычислительной техники, энергетики, машиноприборостроения и промышленных технологий: Тез. докл. нуч.-техн. конф. молодых ученых и специалистов.-Киев, 1988.-С.34.
11. Бова Н.Т., Ефремов Ю.Г., Кинин В.В. и др. Микроэлектронные устройства СВЧ. – Киев: Техника, 1984. – 184 с.
 12. Хижа Г.С., Вендик И.Б., Серебрякова Е.А. СВЧ фазовращатели и переключатели. -Москва «Радио и связь», 1984.-187 с.
 13. Молчанов В.И., Бутко В.И., Прокопенко Ю.В. Фазовращатели миллиметрового диапазона//Современные проблемы радиоэлектроники: Тез. докл. Всесоюз. науч.-техн. конф. 21-23 ноября 1988.- М.,1988. - С.222.
 14. Вайнштейн Л.А. Открытые резонаторы и открытые волноводы.- М.: Сов. радио, 1966.-476с.
 15. Л.В. Алексейчик, И.И. Бродуленко, В.М. Геворкян и др. Состояние и перспективы применения миниатюрных диэлектрических резонаторов в радиоэлектронике. Часть I. Параметры миниатюрных диэлектрических резонаторов на СВЧ и методы их расчета// Обзоры по электронной технике. Сер. Электроника СВЧ.–М.:ЦНИИ "Электроника".-1981.-Вып.13(832).-96с.
 16. Алексейчик Л.В., Беглов В.И., Геворкян В.М. Быстрая электрическая перестройка резонансной частоты диэлектрического СВЧ-резонатора //Труды МЭИ.-1981.-Вып.522.-С.75-81
 17. Черний Б.С. Собственные колебания кольцевых диэлектрических резонаторов СВЧ// Изв. вузов СССР Сер.Радиоэлектроника.-1981. - N 5.-С.43-50.
 18. Войтенко А.Г., Федоров В.Б. Расчет собственных частот открытых диэлектрических резонаторов// Электронная техника. Сер. Электроника СВЧ.- Вып.6(318).-1980.-С.83-87.
 19. Безбородов Ю.М. Цибизов К.Н., Борисов С.А., Методы расчета резонансных частот диэлектрических резонаторов// Зарубежная радиоэлектроника.-1981.- N11.-С.21-34.

20. Analitical and experimental consideration on the resonant frequency and the quality factor of dielectric resonators/ Tsuji M., Shigesawa H., Aoki H., Takiyama K.// IEEE Trans.-1982.- V.MTT.-30.-No.11.-P.1952-1957.
21. Кузнецов В.А., Лерер А.М., Михалевский В.С. Резонансные частоты дисковых диэлектрических резонаторов// Радиотехника и электроника.-1984.-N 11.-С.2124-2128.
22. Алексейчик Л.В. , Бродуленко И.И. , Геворкян В.М. и др. Состояние и перспективы применения миниатюрных диэлектрических резонаторов в радиоэлектронике. Часть II. Пассивные и активные СВЧ-устройства с миниатюрными диэлектрическими резонаторами// Обзоры по электронной технике. Сер. Электроника СВЧ.- М.:ЦНИИ "Электроника".-1982.-Вып.2(865).- 67с.
23. М. Е. Ильченко, В. Ф. Взятыхшев, Л. Г. Гассанов и др. Диэлектрические резонаторы / Под ред. М. Е. Ильченко.-М.: Радио и связь, 1989.-328 с.
24. Молчанов В.И., Бутко В.И., Прокопенко Ю.В. Фазовращатели миллиметрового диапазона// Современные проблемы радиоэлектроники: Тез. докл. Всесоюз. науч.-техн. конф. 21-23 ноября 1988.- М., 1988.-С.222.
25. Бова Н.Т., Ефремов Ю.Г., Кинин В.В. и др. Микроэлектронные устройства СВЧ.- К.: Техніка, 1984.-184 с.
26. Татарчук Д.Д. Добротность составных диэлектрических резонаторов с Е- типом колебаний // Электроника и связь.-1998.- №5.- С.117-119.

Додаток А

Таблиця А.1. [2]

Розрахункові й експериментальні результати визначення резонансних частот циліндричних ДКР з Е- типом коливань із повітряним зазором , виготовлених із кераміки АЛТК ($D=8.0$ мм $g=3$ мм $\epsilon_1=40$).

h мкм.	f_{0e} ГГц	f_{0p} ГГц	Мо- дуль різ- ниці %	h мкм.	f_{0e} ГГц	f_{0p} ГГц	Мо- дуль різ- ниці %	h мкм.	f_{0e} ГГц	f_{0p} ГГц	Мо- дуль різ- ниці %
0	4,394	4,480	2,0	40	4,632	4,600	0,7	160	5,143	5,020	2,4
10	4,467	4,510	1,0	60	4,703	4,659	0,9	200	5,259	5,152	2,0
20	4,513	4,540	0,6	80	4,787	4,717	1,5	240	5,331	5,205	2,4
30	4,547	4,570	0,5	100	4,882	4,775	2,2	290	5,417	5,205	1,6

Таблиця А.2. [2]

Розрахункові й експериментальні результати визначення резонансних частот циліндричних ДКР з Е- типом коливань із повітряним зазором , виготовлених із кераміки АЛТК ($D=7.8$ мм $g=3$ мм $\epsilon_1=40$).

h мкм.	f_{0e} ГГц	f_{0p} ГГц	Мо- дуль різ- ниці %	h мкм.	f_{0e} ГГц	f_{0p} ГГц	Мо- дуль різ- ниці %	h мкм.	f_{0e} ГГц	f_{0p} ГГц	Мо- дуль різ- ниці %
0	4,506	4,599	2,1	60	4,808	4,778	0,6	160	5,240	5,099	2,7
10	4,578	4,629	1,1	80	4,891	4,838	1,1	200	5,353	5,198	2,9
20	4,623	4,659	0,8	100	4,984	4,898	1,7	240	5,424	5,318	2,0
40	4,739	4,718	0,4	130	5,121	4,999	2,4	290	5,509	5,468	0,7

Додаток А

Таблиця Б.3.[2]

Розрахункові й експериментальні результати визначення резонансних частот циліндричних ДКР з Е- типом коливань із повітряним зазором , виготовлених із кераміки АЛТК ($D=7.6$ мм $g=3$ мм $\epsilon_1=40$).

h мкм.	f_{0e} ГГц	f_{0p} ГГц	Мо- дуль різ- ниці %	h мкм.	f_{0e} ГГц	f_{0p} ГГц	Мо- дуль різ- ниці %	h мкм.	f_{0e} ГГц	f_{0p} ГГц	Мо- дуль різ- ниці %
0	4,625	4,720	2,1	60	4,920	4,904	0,3	160	5,342	5,212	2,4
10	4,695	4,751	1,2	80	5,000	4,966	0,7	200	5,453	5,335	2,2
20	4,739	4,781	0,9	100	5,092	5,027	1,3	240	5,523	5,458	1,2
40	4,851	4,843	0,2	130	5,225	5,119	2,0	290	5,606	5,612	0,1

Таблиця Б.4. [2]

Розрахункові й експериментальні результати визначення резонансних частот циліндричних ДКР з Е- типом коливань із повітряним зазором , виготовлених із кераміки ТБНС ($D=6.4$ мм $g=1.6$ мм $\epsilon_1=78$).

h мкм.	f_{0e} ГГц	f_{0p} ГГц	Мо- дуль різ- ниці %	h мкм.	f_{0e} ГГц	f_{0p} ГГц	Мо- дуль різ- ниці %	h мкм.	f_{0e} ГГц	f_{0p} ГГц	Мо- дуль різ- ниці %
0	4,154	4,064	2,2	70	4,422	4,415	0,2	200	5,137	5,068	1,3
10	4,182	4,114	1,6	90	4,609	4,515	2,0	230	5,190	5,219	0,6
30	4,191	4,214	0,5	130	4,838	4,716	2,5	250	5,217	5,301	1,6
50	4,220	4,314	2,2	170	5,000	4,917	1,7	300	5,271	5,401	2,5

Додаток А

Таблиця Б.5. [2]

Розрахункові й експериментальні результати визначення резонансних частот циліндричних ДКР з Е- типом коливань із повітряним зазором , виготовлених із кераміки ТБНС ($D=6.2$ мм $g=1.6$ мм $\epsilon_1=78$).

h мкм.	f_{0e} ГГц	f_{0p} ГГц	Мо- дуль різ- ниці %	h мкм.	f_{0e} ГГц	f_{0p} ГГц	Мо- дуль різ- ниці %	h мкм.	f_{0e} ГГц	f_{0p} ГГц	Мо- дуль різ- ниці %
0	4,288	4,195	2,2	70	4,548	4,557	0,2	200	5,246	5,231	0,3
10	4,315	4,246	1,6	90	4,730	4,661	1,5	230	5,298	5,387	1,7
30	4,324	4,350	0,6	130	4,954	4,868	1,7	250	5,325	5,451	2,3
50	4,352	4,454	2,3	170	5,112	5,076	0,7	300	5,378	5,511	2,5

Таблиця Б.6. [2]

Розрахункові й експериментальні результати визначення резонансних частот циліндричних ДКР з Е- типом коливань із повітряним зазором , виготовлених із кераміки ТБНС ($D=6.0$ мм $g=1.6$ мм $\epsilon_1=78$).

h мкм.	f_{0e} ГГц	f_{0p} ГГц	Мо- дуль різ- ниці %	h мкм.	f_{0e} ГГц	f_{0p} ГГц	Мо- дуль різ- ниці %	h мкм.	f_{0e} ГГц	f_{0p} ГГц	Мо- дуль різ- ниці %
0	4,431	4,334	2,2	70	4,683	4,709	0,5	200	5,364	5,406	0,8
10	4,458	4,388	1,6	90	4,860	4,816	0,9	230	5,415	5,554	2,6
30	4,466	4,495	0,6	130	5,078	5,030	0,9	250	5,440	5,576	2,5
50	4,493	4,602	2,4	170	5,233	5,245	0,2	300	5,492	5,631	2,5